

## 심우주 지구 반사율 측정용 아몬라 가시광 채널의 광학 시스템 제조 및 성능 평가

박원현<sup>1†</sup>, 김성희<sup>2</sup>, 이한신<sup>3</sup>, 이현수<sup>1</sup>, 이재민<sup>1</sup>, 함선정<sup>1</sup>, 윤지연<sup>1</sup>, 김석환<sup>1</sup>,  
양호순<sup>4</sup>, 최기혁<sup>2</sup>, 김진철<sup>2</sup>, Mike Lockwood<sup>3</sup>, Nigel Morris<sup>3</sup>, Ian Tosh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 천문우주학과

<sup>2</sup>한국항공우주연구원

<sup>3</sup>Rutherford Appleton Laboratory, UK

<sup>4</sup>한국표준과학연구원

## OPTICAL PERFORMANCE OF BREADBOARD AMON-RA IMAGING CHANNEL INSTRUMENT FOR DEEP SPACE ALBEDO MEASUREMENT

Won Hyun Park<sup>1†</sup>, Seonghui Kim<sup>2</sup>, Hanshin Lee<sup>3</sup>, Hyun-Su Yi<sup>1</sup>, Jae-Min Lee<sup>1</sup>,  
Sun-Jung Ham<sup>1</sup>, Jeeyeon Yoon<sup>1</sup>, Sug-Whan Kim<sup>1</sup>, Ho Soon Yang<sup>4</sup>, Ki-Hyuk Choi<sup>2</sup>,  
Zeen Chul Kim<sup>2</sup>, Mike Lockwood<sup>3</sup>, Nigel Morris<sup>3</sup>, and Ian Tosh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Korean Aerospace Research Institute, Deajeon 305-333, Korea

<sup>3</sup>Rutherford Appleton Laboratory, UK

<sup>4</sup>Korean Research Institute of Standards and Science, Deajeon 305-340, Korea

E-mail: nova8028@gmail.com

(Received December 6, 2006; Accepted February 26, 2007)

### 요 약

지구와 태양 사이의 중력 평형점에서 해일로 궤도로 운용되며, 심우주 반사율(albedo)을 측정코자 하는 EARTHSHINE 미션의 과학적 목적에 최적화된 아몬라 가시광 채널의 성능 인증 모델용 광학 시스템 개발을 완료하였다. 아몬라 광학계 설계 요구사항에 부합하는 설계안과 공차분석 결과를 바탕으로 광학 시스템의 설계, 부품 제작, 결합, 정렬, 성능 검증까지의 전 공정을 순수 국내 개발하였으며 특히 측정된 부품들의 광파면 오차를 결합 및 성능 평가 공정에 역투입하는 신 공법에 의하여 성능 검증을 실시하였다. 최종 결합 및 정렬이 완료되어 측정된 아몬라 광학계의 광파면 오차는 중심 시야에서 RMS 0.091 wave(기준 파장: 632.8nm)이며, Ensquared Energy(EE) 성능은 61.7%(14 $\mu$ m 이내), 변조전달함수(MTF) 성능은 35.3%(기준 주파수: 35.7mm<sup>-1</sup>)이다. 위 결과들은 아몬라 가시광 채널의 요구사항을 모두 만족시킴으로써 개발된 아몬라 가시광 채널 광학계가 EARTHSHINE 미션의 과학목적을 완수할 수 있음을 증명하였다.

### ABSTRACT

The AmonRa instrument, the primary payload of the international EARTHSHINE mission, is designed for measurement of deep space albedo from L1 halo orbit. We report the optical design, tolerance analysis and the optical performance of the breadboard AmonRa imaging channel instrument optimized for the mission science requirements. In particular, an advanced wavefront feedback process control technique was

<sup>†</sup>corresponding author

used for the instrumentation process including part fabrication, system alignment and integration. The measured performances for the complete breadboard system are the RMS 0.091 wave(test wavelength: 632.8 nm) in wavefront error, the ensquared energy of 61.7%(in 14  $\mu\text{m}$ ) and the MTF of 35.3%(Nyquist frequency: 35.7  $\text{mm}^{-1}$ ) at the center field. These resulting optical system performances prove that the breadboard AmonRa instrument, as built, satisfies the science requirements of the EARTHSHINE mission.

*Keywords:* space payload, optical design, precision fabrication, optical system test

## 1. 서 론

20세기에 들어 지구의 평균 표면 온도는  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$  상승하였다(Houghton et al. 2001). 이 경향은 태양권(heliopause)에 속한 지구 기후 시스템이 태양의 흑점의 변화, 플레어 등 태양 활동 및 구름, 수증기, 해양 및 에어로졸 등의 지구의 내적 영향으로 인하여 지구 기후 시스템이 변하고 있음을 시사한다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 보고에 따르면 서로 다른 기후 모델을 적용하여 2000년부터 2100년까지의 지구 표면 온도의 변화에 대한 수치 모사를 실시한 바 있으며, 앞서 언급한 인자들의 높은 불확실성으로 인해 1.4에서  $5.8^\circ\text{C}$ 에 이르는 표면온도 증가 가능성을 제시하였다(Watson et al. 2001). 태양으로부터 지구로 전달되는 빛의 복사량을 결정짓는 구름의 영향만을 고려하여도 대기 상한으로부터 그 변화량은 매우 높다(Ramanathan et al. 1989). 특히 지구 반사율은 지구 기후 시스템의 현 상태를 파악하고 앞으로의 기후 변화를 예측함에 있어 중요한 인자이다(Raval & Ramanathan 1989).

미국 Big Bear 태양관측소는 지구의 대기 상한으로부터 반사된 태양빛이 달의 어두운 면에 반사되어 다시 지구로 돌아오게 되는 빛, 즉 ashen light을 이용하여 지구 반사율을 측정하였다(Goode et al. 2001). 그러나 이 측정방법은 다음과 같은 한계를 지니고 있다(Palle et al. 2004, Wielicki et al. 2005). 첫째, ashen light을 관측할 수 있는 태양-달-지구의 기하학적 위치가 제한되어 정확한 분석을 위한 자료 축적이 충분하지 않다. 둘째, 지구 대기의 영향으로 인한 ashen light의 흡수, 반사, 산란 등이 관측의 자료의 정확성을 저하시킨다. 위와 같은 문제를 해결하기 위해 여러 많은 방법론이 적용되었지만 분석 자체가 복잡하며 오차 범위가 크다.

한편 미국 NASA의 CERES(Clouds and the Earth's Radiant Energy System) 탑재체는 3개의 인공위성에 총 5개의 기기가 설치되어 지구의 약 700km 상공에서 98.8분 주기로 공전을 하며 지구 반구의 약 11.2%를 차지하는 국지적 지구 반사율을 측정하였다(Wielicki et al. 1996). 대기권 밖에서 20km부터 50km에 이르는 영역에 대한 반사율 측정이 이루어졌으나 지구 전체의 반사율 분포도를 제작하기까지 한 달간의 장시간을 요한다. 따라서 국지적 측정으로 매 순간 변화하는 지구 반사율을 단시간 내에 도출할 수 없으며 각 탑재체에서 측정한 결과 사이의 복잡한 inter-calibration을 거쳐야 하는 단점이 있다.

정지궤도 위성인 Meteosat8에 탑재된 GERB(Geostationary Earth Radiation Budget)는 지구 반구의 86.8%에 대한 지구 반사율을 지속적으로 관측하였다(Mueller et al. 1999). 그러나 정지궤도 위

표 1. 아몬라 가시광 채널의 요구 성능(Lee 2004).

Parameter	Value	Parameter	Value
Working wavelength( $\mu\text{m}$ )	0.4 ~ 0.75	Nyquist sampling frequency( $\text{mm}^{-1}$ )	35.7
Field of view(deg.)	4	MTF(%)	> 30
Target pixel size <sup>a</sup> ( $\mu\text{m}$ )	14	Ensquared energy(%)	> 60
Accommodation(mm)	200×150×150	System wavefront error PV(wave <sup>b</sup> )	< 1

<sup>a</sup>Kodak KLI2133 CCD<sup>b</sup>wave는 성능 평가시 사용되는 적색 레이저의 파장=632.8nm

성은 임의의 시각에 지구의 한 면 밖에는 관측이 불가능하며 지구 극지방의 관측이 불가능하다. 또한 다른 장비들에 의해 관측된 자료가 부족하여 저궤도 측정과 마찬가지로 inter-calibration이 어렵다는 단점이 존재하여 왔다.

EARHTSHINE Mission은 위와 같이 각 다른 방법론의 문제점을 근본적으로 해결하기 위해 제안되었다(Lockwood et al. 2004a). EARTHSHINE의 주 탑재체인 아몬라는 가시광 채널과 에너지 채널을 탑재한 듀얼 채널 시스템(Lockwood et al. 2004b)으로써 지구와 태양 사이의 라그랑지(Lagrange) 제 1점을 중심으로 하는 헤일로 궤도로 운용되어 에너지 채널의 경우 태양 복사량 전체의 크기 및 지구 대기 상한에서의 반사량을 측정하며, 가시광 채널의 경우 지구 반구의 99.6%에 대한 전 지구 반사율을 지속적으로 관측을 하게 된다. 아몬라 탑재체를 이용한 분단위의 전 지구 반사율 측정은 지금까지 축적해 온 지구 반사율 분포 자료를 검보정 함에 있어 정확한 기준 자료를 제공할 것으로 기대되고 있다.

이 논문은 지구 온난화의 경향을 예측하는데 주요인이 되는 전 지구 반사율 측정에 기여할 아몬라 가시광 채널 광학 시스템의 설계, 제작 및 성능 검증 등 전 공정에 걸쳐 핵심 기술이 개발, 확립되었음을 기술하고자 한다. 2장에서는 아몬라 가시광 채널의 개량된 광학 시스템 설계를 제안하였으며 3장에서는 측정된 파면오차를 결합 수치 모사에 활용하여 최종 시스템 성능을 예측하는 신 공정 기법 및 광학 정렬 기법에 관하여 기술하였다. 4장에서는 광학 시스템의 파면오차, EE(Ensquared Energy) 및 MTF(Modulation Transfer Function) 성능 결과를 제시하여 이 연구에서 설계, 제작된 아몬라 가시광 채널이 심우주 탑재체로써 충분한 성능을 보유하고 있음을 증명하였다. 5장에서는 결과에 대한 토의 및 결론을 기술하였다.

## 2. 아몬라 가시광 채널의 설계

### 2.1 요구사항

서론에서 언급된 EARTHSHINE의 과학적 목적을 완수하기 위한 아몬라 가시광 채널 설계안의 요구사항은 표 1과 같다(Lee et al. 2004). 특히 광학계의 광파면 오차의 PV값에 상응하는 광파면 오차 RMS는 PV값의 약 1/5인 0.2 wave를 기준으로 하였다(Fischer & Tadic-Galeb 2000).

### 2.2 광학 설계안 및 성능 분석

아몬라 가시광 채널은 그 요구 성능에 부합하는 여러가지 서로 다른 설계안 가운데 임무수행에 가장 이상적인 반사굴절 망원경(catadioptric telescope) 방식의 설계안(그림 1a)으로 결정된 바 있

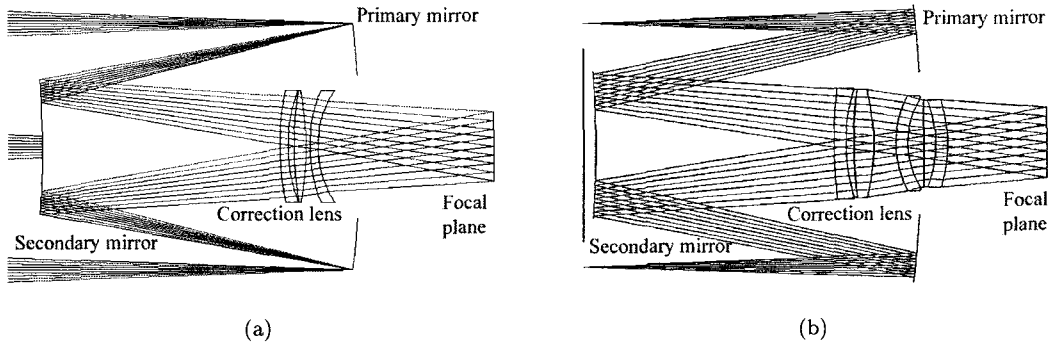


그림 1. (a) 아몬라 가시광 채널 반사굴절 망원경식 설계의 레이아웃(Lee 2004), (b) 개선 사항이 수정된 아몬라 가시광 채널의 최종 설계안.

표 2. 반사굴절 망원경식 설계안과 최종 수정된 아몬라 가시광 채널의 세부사항.

Prescription parameter	Catadioptric telescope model	Modified model
The number of surfaces	8	10
Aperture stop	Primary mirror	Secondary mirror
System aperture(mm)	62.0	58
Entrance pupil diameter(mm)	62.0	58
Exit pupil diameter(mm)	62.1	57.037
Effective focal length(mm)	248.0472	235.9553
Working F-number	4.0	4.07
Maximum Field angle(deg.)	±2	±2
Working wavelength(nm)	400~750	400~750

표 3. 최종 수정된 설계의 광학면 세부사항.

Surf. No	Surface	Radius of curvature	Thickness	Glass	Note
1	Dummy tube	-	190.5	-	instrument
2	Stop	-	85	-	aperture stop
3	Primary mirror	-290.62	-82	mirror	c=-1
4	Secondary mirror	-273.66	60	mirror	sphere
5	Lens01 front	104.22	3	fused silica	sphere
6	Lens01 rear	40.09	2	-	sphere
7	Lens02 front	90.01	5	CaF <sub>2</sub>	sphere
8	Lens02 rear	-49.57	5.6	-	sphere
9	Lens03 front	22.95	3	fused silica	sphere
10	Lens03 rear	18.91	7	-	sphere
11	Lens04 front	-28.17	3	fused silica	sphere
12	Lens04 rear	-34.09	25	-	sphere
13	Detector	-	-	-	-

다(Lee 2004). 이 연구에서는 이 같은 아몬라 가시광 채널 초기 설계의 문제점을 다음과 같이 수정, 보완 및 개량하였다.

첫째, 반사굴절 망원경식 초기 설계안의 구경 제한면(aperture stop)을 주경 위치에서 부경의 정

표 4. 아몬라 가시광 채널 설계안의 공차 분석 결과.

Tolerance Index	M1	M2	C1F	C1B	C2F	C2B	C3F	C3B	C4F	C4B
Radius of Curvature(mm)	±2	±2	±0.8	±0.15	±0.7	±0.2	±0.2	±0.15	±0.15	±0.2
Conic Constant	±0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thickness(mm)	±0.05	Pickup from M1	±1	±1	±0.8	±0.3	±0.2	±0.6	±0.2	Comp. <sup>1</sup>
Element Decenter(mm)	-	±0.10	±0.06	±0.025	±0.25	±0.08	±0.25	±0.08	±0.08	±0.08
Element Tilt(deg.)	-	±0.025	±0.1	±0.04	±0.7	±0.2	±0.7	±0.2	±0.2	±0.2
Lens Mount Decenter(mm)	-	-	-	-	±0.06	±0.06	±0.06	±0.06	±0.06	±0.06
Lens Mount Tilt(deg.)	-	-	-	-	±0.03	±0.03	±0.03	±0.03	±0.03	±0.03
Lens Surface Wedge(mm)	-	-	±0.03	±0.03	±0.05	±0.01	±0.03	±0.03	±0.015	±0.02
PV Surface Irregularity(wave)	0.35	0.40	-	-	-	-	1	-	-	-
RMS Surface Irregularity(wave)	0.07	0.08	-	-	-	-	0.2	-	-	-
Lens Glass Index	-	-	-	-	-	-	±0.001	-	-	-

<sup>1</sup> Comp.는 detector의 위치 공차로 추후 MTF 측정 등으로 바로 재검열될 값이므로 현 공차분석에서는 보상자(compensator)로 두었음.

점(vertex)으로부터 -3mm 위치로 이동하였다. 구경 제한면이 주경에 위치한 경우 시야각에 따른 부경 차폐 위치 변동을 가져와 비네팅(vignetting)을 유발하며 그 결과 광학계 내부에 입사된 빛이 기계부 표면에서 산란하여 잡광(straylight)을 발생시킨다(Lee 2004). 그러나 수정 설계안의 경우 가시광 채널의 성능에 큰 악영향을 미치는 잡광이 광학계 외부에서 원천적으로 차폐된다. 이 같은 장점은 구경 제한면 이후의 경통내의 산란광 자체를 줄이는 것으로 주경 배플(primary baffle) 및 부경 배플(secondary mirror baffle) 설계 자체에 크게 심혈을 기울이지 않아도 되므로 보다 효율적이다.

둘째, 구경 제한면의 위치 이동으로 인한 수차 변동량을 조절하기 위하여 보정 렌즈 설계안의 변경이 필요하다. ±2°에 해당하는 시야 전역에서 축상 거리에 따른 코마 수차(coma) 보정 및 비축 초점 평탄화(astigmatism and field curvature minimize)를 하기 위해 한 장의 렌즈를 추가하였다. 결과적으로 BK7G18, Fused Silica로 구성된 3장의 보정렌즈를 Fused Silica, CaF2를 사용한 4장의 보정 렌즈로 대체하였다.

셋째, 기존 설계의 보정렌즈 두께는 2~3mm로 제작상 비용 효율적이지 못하다. 그러므로 각 보정렌즈의 두께를 최적화된 성능 내에서 3~5mm로 증가시켰다. 위와 같은 개선사항과 표 1에 명시된 요구사항을 고려한 아몬라 가시광 채널의 최종 설계안은 그림 1b와 같으며 표 2에는 광학계 세부사항을, 표 3에는 설계된 광학면의 세부사항을 나타내었다.

### 2.3 공차분석

아몬라 가시광 채널 광학 시스템의 공차분석(tolerance analysis)의 결과는 광학계를 제작, 조립하는 과정에서 허용되는 오차를 제시한다. 이 연구에서는 2.1절에서 논의된 RMS 광과면 오차를 분석 변수로 하여 몬테칼로(Monte-Carlo) 수치 모사 기법을 이용한 아몬라 가시광 채널의 공차 분석을 실시하였다.

광학 부품 제작시 필요한 공차에는 주경 및 보정렌즈의 두 개의 광학 면에서의 비구면 계수, 그 외의 광학면의 곡률반경, 모든 면에서의 불규칙도(surface irregularity)가 있으며, 광학 부품의 두께 및 두께편차(wedge)가 포함되며, 렌즈 재료의 굴절률과 분산 값도 포함된다. 광학 부품 정렬 과정에서 포함되는 공차에는 각 광학 부품의 거리와 편심(decenter), 기울기(tilt) 변수가 있다. 또한 보정렌

표 5. 제작 완료된 광학 부품의 세부사항.

Optics <sup>1</sup>	Radius of curvature(mm)		Diameter(mm)		Surface irregularity(wave)	
	Designed	Measured	Designed	Measured	Tolerance (RMS)	Measured (RMS)
M1	-290.62±2	-290.39	76±0.05	76.00	0.07	0.043
M2	-273.66±2	-273.38	38±0.05	38.00	0.08	0.041
C1F	104.22±0.2	104.37	29±0.02	29.00	0.2	0.037
C1B	40.09±0.1	40.03	29±0.02	29.00	0.2	0.044
C2F	90.01±0.2	89.95	29±0.02	28.99	0.2	0.052
C2B	-49.57±0.15	-49.53	29±0.02	28.99	0.2	0.064
C3F	22.95±0.15	22.92	25±0.02	24.99	0.2	0.032
C3B	18.91±0.1	18.91	25±0.02	24.99	0.2	0.038
C4F	-28.17±0.1	-28.08	25±0.02	24.99	0.2	0.038
C4B	-34.09±0.15	-34.07	25±0.02	24.99	0.2	0.030

<sup>1</sup>Optics 항목의 M과 C는 각각 거울과 보정렌즈를 의미하며 F와 B는 각각 앞면과 뒷면을 의미한다.

즈의 경우 네 개의 렌즈를 하나의 경통에 장착되므로 렌즈군(correcting lens group)에 대한 편심과 기울기에 대하여 추가적인 공차분석을 실시하였다.

공차분석 결과 기준 파장 632.8nm에서 0.0063wave인 설계 파면오차가 공차 적용 후에는 0.079wave로 변화하였다. 또한 표 4의 공차 분석 결과로 부터 공차광학 부품 제조시 주경과 부경의 파면 오차 정밀도와 부품 정렬시 부경의 기울기 및 보정렌즈의 편심 등이 아몬라 가시광 채널의 시스템 성능에 크게 영향을 미치는 요소임을 확인하였다.

### 3. 시험 모델 제작

#### 3.1 광학 부품 제조

앞서 논의된 공차분석으로부터 아몬라 가시광 채널의 주경(M1)이 광학계 전체의 파면오차 성능에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 주 반사경은 오목포물면으로 광학계 가공의 핵심적 부분인 비구면 가공기술을 사용하여 제작하였으며, 재료는 Zerodur를 사용하였다. 우선 설계된 오목포물면에 가장 잘 맞는 곡률 반경을 계산한 뒤 곡면 생성기(curve generator)를 이용하여 축대칭 오목구면 형상을 얻는다. 나머지 만곡편차(sag)는 연삭(grinding)을 통하여 물질제거를 하며 마지막으로 연마(polishing)를 통해 파면오차를 요구조건에 부합되도록 제작하였다.

부경(M2)의 반사면은 구면 블록면으로 주경과 함께 Amon-Ra 광학계의 성능에 중요한 역할을 한다. 부경의 재료로 Zerodur를 사용하였으며 제작은 곡면 생성기로 설계된 곡률반경을 갖는 축대칭 블록면으로 가공한 뒤 연마를 통하여 파면오차의 공차 범위에 알맞도록 제작하였다.

표 5에서는 주경으로부터 보정렌즈에 이르는 모든 광학 부품의 광학면에 대한 설계치와 제조 완료되어진 각 부품의 광학면의 측정치를 비교하였다. 측정된 곡률반경, 지름, 파면오차 모두 분석된 공차 내에 있으며 특히 아몬라 가시광 채널 시스템 성능 저하에 큰 영향을 미치는 주경 및 부경의 파면오차가 공차에 비해 각각 1.6배, 2배의 향상된 성능을 갖고 있다.

#### 3.2 결함 및 정렬

Amon-Ra 가시광 영역의 망원경이 최상의 성능을 발휘하기 위하여 각 광학계 부품들이 광학계

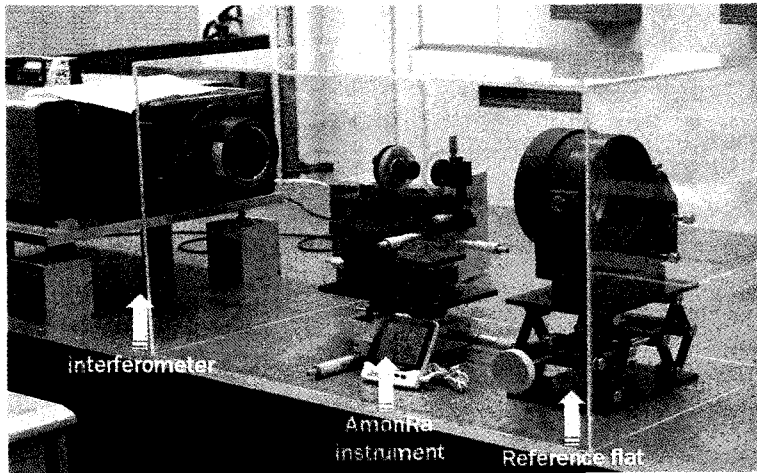
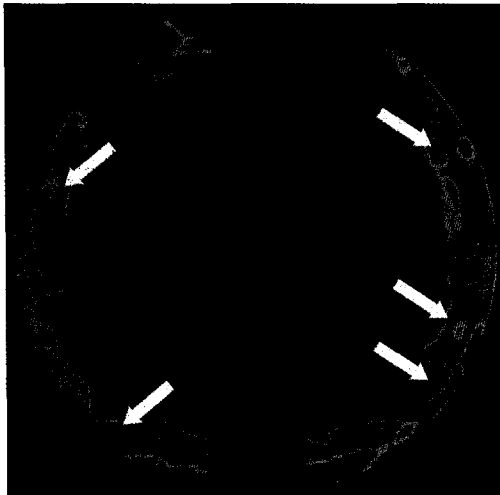
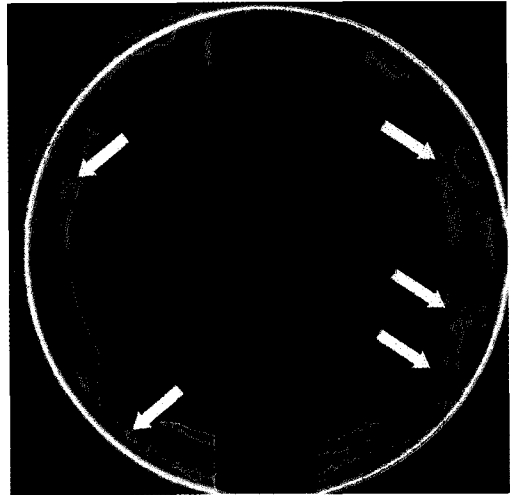


그림 2. 아몬라 가시광 채널 Breadboard 시스템의 전 부품 결합 및 광학계 성능 평가 준비 완료.



(a)



(b)

그림 3. (a) 수치 모사를 통해 획득되어진 중심 시야에서의 아몬라 가시광 채널 시스템 성능(RMS 0.089wave), (b) 부품 결합 및 정렬이 완료된 중심 시야에서의 아몬라 가시광 채널 시스템 성능(RMS 0.091wave).

요구 조건 이내로 잘 제작되어야 할 뿐 만 아니라 각 부품들 간에 마이크로 단위의 미세하고 정확한 정렬이 필요하다.

아몬라 가시광 채널의 광학 정렬을 위한 실험 설계안은 다음과 같다. 그림 2에서와 같이 우선 위상천이 간섭계의 4인치,  $f/3.5$ 의 구면 투과 렌즈(transmission sphere)로부터 632.8nm 파장의 적색 레

이저 구면파(spherical wavefront)가 발생하며 이 파면은 아몬라 가시광 채널의 초평면(focal plane)에서 초점을 맺은 후 보정렌즈 경통으로 입사된다. 4장의 보정렌즈를 지난 빛은 부경 면에서 반사되어 주경으로 향하고 주경 면에서 반사된 빛은 평행으로 기준 평면거울(reference flat mirror)에 수직 반사되며 반사된 빛은 지나온 경로의 역방향으로 다시 진행하여 위상천이 간섭계로 되돌아간다. 이때, 위상천이 간섭계는 기준광선의 파면과 아몬라의 각 광학 면을 지나며 발생된 파면 사이의 간섭무늬를 측정하여 RMS 광파면 오차를 산출한다. 모든 아몬라 광학 면을 두 번씩 통과 하였으므로 산출된 광파면 오차의 절반 값이 실제 아몬라 가시광 채널의 광학 성능이다.

이와 같은 광학 정렬 설계안과 표 4에 제시된 아몬라 가시광 채널의 허용공차를 바탕으로 모든 부품들의 결합이 진행되었다. 기계공차 0.01mm 단위에서 제작되어 경통 내부에 4장의 보정렌즈를 결합 완료 하였으며(Yoder 1995), 주경과 보정렌즈근과의 편심 오차는 회전 테이블과 다이얼 게이지를 사용한 중심조절기법(centering)을 이용하여 0.001mm 단위까지 감소시켰다. 한편 위상천이 간섭계와 기준 평면거울을 정렬하여 기준계를 구성한 뒤 주경과 부경에 각각 5자유도의 제어가 가능하도록 스테이지들을 설치하여 정렬을 진행하였다. 특히 측각기(goniometer)를 이용하여 공차 분석으로부터 협소한 허용오차로 예측된 부경의 기울기를 보정하였다.

기존의 광학계 정렬 방법은 제작된 개별 광학 부품이 설계 요구사항을 만족하는지 여부와 전 광학계의 파면오차 성능 결과만을 획득하는데 그쳤다(이영훈 외 2006a,b, 양호순 외 2005). 더욱이 아몬라와 같은 위상용 탑재체의 정밀한 광학정렬(김도형 외 2004, 양호순 외 2001)에 있어서도 국내에서는 실제 기존 광학계 정렬 방법과 같이 이론적인 설계안으로부터 도출된 요구사항과 파면오차 결과로부터 얻어진 정렬 결과 수치만을 통해 그 성능을 판단하고 있다. 이와 같은 방법은 실제 정렬시 작용하는 많은 자유도의 불확실성을 배제하는 것이다.

반면 이 연구에서는 광학계 정렬을 하는 동안 이전에 측정된 각 개별 광학면의 파면오차 격자(grid) 자료를 이상적인 설계안과 대응되는 면에 투입하였으며, 이를 통해 수치 모사된 성능(그림 3a)과 실제로 조립 및 결합 완료되어 측정된 아몬라 가시광 채널 광학계의 성능(그림 3b)을 비교한 뒤, 상호 데이터간의 피드백을 역투입하는 신 공법을 실시하였다. 즉 실험 결과를 미리 예상하여 정렬 실험 결과와 비교할 수 있는 기준을 수치적인 요소 뿐 만 아니라 직관적으로 알 수 있는 파면오차 그림을 제공했다는 것에 큰 의의가 있다. 또한 광축 및 X, Y축으로 각각  $\pm 2^\circ$ 의 비축까지 모두 5개의 시야를 대상으로 한 검증 뿐 만 아니라 측정 자료를 EE 성능 및 MTF 성능으로 변환을 한 뒤 설계치, 예상치와 비교, 검증하여 그 신뢰도를 높이는 데 기여하였다.

그림 3a,b의 화살표 위치를 비교하면 수치 모사를 통해 예상된 파면오차와 측정된 파면오차가 거의 흡사함을 확인할 수 있으며, 수치 모사되어진 구경과 같은 크기에 해당하는 부분을 황색 원으로 표시하였다.

그림 4는 위상천이 간섭계로부터 측정하여 획득된 중심 시야 및 비축 시야각 4도에서의 파면오차의 RMS 수치이다. 광축 및 비축에서 모두 요구조건을 만족하고 있으나 비축에서 예상치와 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 이 측정 결과는 아몬라 가시광 채널 광학계의 초기에 정렬이 되어 있지 않은 상태에서 신공법에 의한 반복적 정렬로 단계적으로 요구치에 맞게 수치를 낮추었고 비축의 파면오차가 요구치를 만족하는 시점에서 정렬을 중단하였기 때문에 발생한 것이며 보다 많은 시간과 노력을 들여 피드백을 주면 측정결과는 앞으로 더욱 향상될 것이다. 요약하면 측정된 모든 파면오차 값



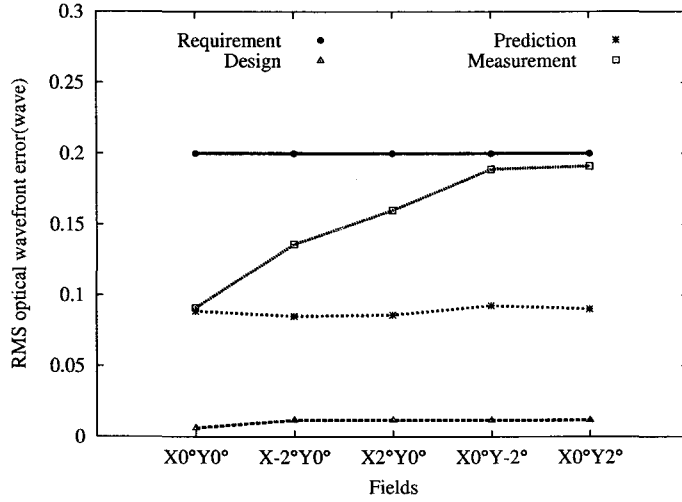


그림 4. 광축 및 비축의 아몬라 가시광 채널 시스템 성능 비교.

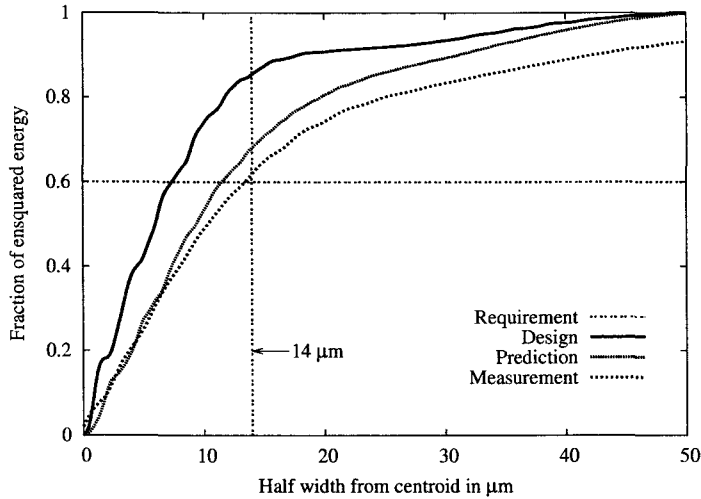


그림 5. 광축에서의 설계, 수치 모사, 측정된 아몬라 가시광 채널의 EE 성능 비교.

이 임무수행을 위한 요구사항 0.2wave 이하를 충족시키고 있다는 사실로부터 제작 완료된 아몬라 가시광 채널의 임무 수행의 가능성을 추론해 볼 수 있다.

#### 4. 시스템 EE 성능 및 MTF 성능 평가

아몬라 가시광 채널의 EE 성능은 14μm 크기의 픽셀 하나에 60% 이상을 만족해야 한다. 그림 5는 632.8nm 기준 파장에서 EE 성능을 비교 분석한 결과이다. 설계된 아몬라 광학계 광축에서의 EE 성능은 14μm에서 85.5%이며, 수치 모사된 성능은 68.1%, 측정치는 61.7%로 모두 요구조건을 만족한다. 비축에서의 EE 성능 또한 광축에서의 성능과 비교할 때, 크게 차이가 나지 않는다.

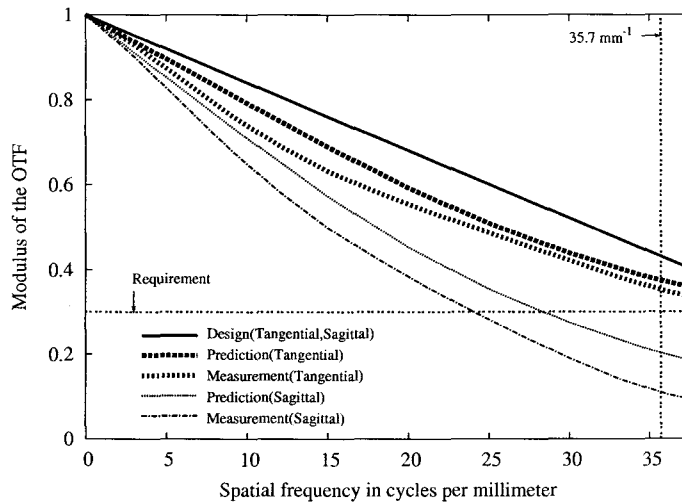


그림 6. 광축에서의 설계, 수치 모사, 측정된 아몬라 가시광 채널의 MTF 성능 비교.

한편 광축에서의 Tangential MTF 성능의 경우(그림 6)에도 EE 성능과 동일한 비교 분석 방법으로 Nyquist 주파수  $35.7\text{mm}^{-1}$ 에서 최종 정렬 후 측정된 Tangential MTF 성능(35.3%)이 설계치(47.6%)와 수치 모사 결과값(37.4%)보다 낮은 값을 갖고 있으나 수치 모사를 통해 예측된 값과 큰 차이를 보이지 않으며 요구조건을 만족하고 있다. 그러나 Sagittal MTF 성능은 예상치 및 측정치 모두 요구조건인 30% 이하 수준이다. 이 결과는 정렬 실험에 사용된 부경의 자유도 조절을 위한 측각기(goniometer) 및 수직 지지구조물의 차폐(그림 3a)로 인한 결과로 향후 아몬라 가시광 채널의 비행모델(flight model) 제작시 스카이드 구조로 대체되면 수직 방향의 차폐가 사라지게 되어 sagittal MTF의 본래 성능을 발휘할 것이다.

## 5. 토의 및 결론

지구 온난화의 경향을 예측하는데 주요인이 되는 전 지구의 반사율 측정에 기여할 아몬라 가시광 채널의 설계, 제작, 결합, 정렬된 광학 시스템의 성능 검증을 완료하였다. 설계 단계에서부터 수치 모사하여 아몬라 가시광 채널의 이상적인 성능을 파면오차를 통하여 미리 예상하였으며, 부품 제작에 필요한 공차분석을 병행하였다. 부품 제작 완료 후 실제 제작된 광학 부품의 측정된 성능을 아몬라 이상적인 설계안에 각각 대입하여 실제 성능 측정시 예상되는 결과 값을 추정하였으며, 결합 및 성능 측정 단계의 모든 공정에서 아몬라 가시광 채널의 성능을 수치 모사하여 측정 결과를 미리 예상, 확인하는 신 공법을 개발, 활용하였다. 이와 같은 공법은 광학계 정렬에 있어 기존의 결과 위주의 공법(김도형 외 2004, 양호순 외 2001, 2005, 이영훈 외 2006a,b)보다 진일보된 기술이라 할 수 있다.

파면오차 RMS를 활용한 성능 평가는 광축 그리고 X, Y축으로 각각  $\pm 2^\circ$ 의 비축까지 모두 5개의 시야(field)를 대상으로 한 검증을 통해 광학 시스템의 성능 평가 신뢰도를 향상시켰다. 측정된 아몬라 광학계의 파면오차는 광축에서 수치 모사된 결과와 거의 같았으며 비축에서의 성능은 수치 모사된 광학 시스템 성능 0.1wave 이하 값들보다 저하된 성능을 보이거나 모두 요구조건 0.2wave 이하의 값

을 만족시키기에 충분하다. 또한 MTF 성능 30% 이상, EE 성능 60% 이상에 부합함을 최종 확인하였다.

이 연구 결과는 광추적 기법을 이용한 통합적 End-to-End 과학 임무 성능 평가 수치 모사 기법에 활용되어, 궤도상에서의 과학 임무 성능 여부가 다시 한 번 확인되었다(이재민 외 2007). 이로써 국제적 우주 미션 EARTHSHINE의 주 탑재체를 직접 개발함과 동시에 전 공정에 걸친 핵심 기반 기술을 갖추고 공정을 성공적으로 완료하였음에 큰 의의가 있다.

### 참고문헌

- 김도형, 최영완, 강명석, 김이을 2004, 한국광학회지, 15, 4
- 양호순, 이운우, 김정주, 엄해동, 이수상, 김연수, 김현숙 2005, 한국광학회지, 16, 6
- 양호순, 최영완, 김이을, 강명석, 양승욱, 송종섭, 이운우 2001, 한국광학회 하계학술발표대회 논문집, pp.216-217
- 이영훈, 조재홍, 임천석, 양순철, 김건희, 원종호, 정연홍 2006a, 한국광학회지, 17, 412
- 이영훈, 조재홍, 임천석, 이운우, 양호순, 이재협, 이인원 2006b, 한국광학회지, 17, 165
- 이재민, 박원현, 함선정, 이현수, 윤지연, 김석환, 최기혁, 김진철, Lockwood, M. 2007, 한국우주과학회지, 24, 69
- Fischer, R. E. & Tadic-Galeb, B. 2000, Optical System Design (New York: McGraw-Hill), p.54
- Goode, P. R., Qiu, J., Yurchyshyn, V., Hickey, J., Chu, M. C., Kolbe, E., Brown, C. T., & Koonin, S. E. 2001, GRL, 28, 1671
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Nogure, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., & Johnson, C. A. 2001, CLIMATECHANGE 2001: The Scientific Basis (New York: Cambridge University Press), p.3
- Lee, H. S. 2004, MSc Thesis, Yonsei University
- Lee, H. S., Tosh, I., Morris, N., Lockwood, M., & Kim, S. W. 2004, in Optical Design and Testing II, eds. Y. Wang, Z. Weng, S. Ye, & J. M. Sasian (Bellingham: SPIE), pp.248-261
- Lockwood, M., Morris, N., Smith, M. F., Haigh, J. D., Waltham, N. R., Russell, J., Barnett, J., Allen, M. R., Crooks, S., Coates, A. J., James, A., Fazakerley, A. N., Owen, C. J., Harra, L., Horbury, T., Carr, C., Cargill, P., Castelli, C., Kirkby, J., Rouillard, A., Eyles, C., Goode, P., Stott, P., Harrison, R. G., Lean, J. L., Wang, Y. M., Harrison, R. A., Carslaw, K., Baran, A., Gray, L., Loeb, N., Hobbs, S., Ward, R., & Chalenor, C. 2004a, Proposal, Earth-Sun-Heliosphere Interactions Experiment: the EARTHSHINE mission A. Science Case, pp.25-27, 55-57
- Lockwood, M., Morris, N., Smith, M. F., Haigh, J. D., Waltham, N. R., Russell, J., Barnett, J., Allen, M. R., Crooks, S., Coates, A. J., James, A., Fazakerley, A. N., Owen, C. J., Harra, L., Horbury, T., Carr, C., Cargill, P., Castelli, C., Kirkby, J., Rouillard, A., Eyles, C., Goode, P., Stott, P., Harrison, R. G., Lean, J. L., Wang, Y. M., Harrison, R. A., Carslaw, K., Baran, A., Gray, L., Loeb, N., Hobbs, S., Ward, R., & Chalenor, C. 2004b, Proposal,

- Earth-Sun-Heliosphere Interactions Experiment: the EARTHSHINE mission B. Instrument & Work Package Descriptions, p.5
- Mueller, J., Stuhlmann, R., Dammann, K., Hollmann, R., Harries, J. E., Kellock, S., Mossavati, R., Wrigley, R., Crommelynck, D., Dewitte, S., Allan, P., Caldwell, M., & Sawyer, E. 1999, *Advances of Space Research*, 24, 921
- Palle, E., Goode, P. R., Montanes-Rodriguea, P., & Koonin, S. E. 2004, *Science*, 304, 1299
- Ramanathan, V., Cess, R. D., Harrison, E. F., Minnis, P., Barkstrom, B. R., Ahmad, E., & Hartmann, D. 1989, *Science*, 243, 57
- Raval, A. & Ramanathan, V. 1989, *Nature*, 342, 758
- Watson, R. T. & Core Writing Team, 2001, *Climate Change 2001: Synthesis Report* (Cambridge: Cambridge University Press), p.34
- Wielicki, B. A., Barkstrom, B. R., Harrison, E. F., Lee, R. B., Smith, G. L., & Cooper, J. E. 1996, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 853
- Wielicki, B. A., Wong, T., Loeb, N., Minnis, P., Priestly, K., & Kandel, R. 2005, *Science*, 308, 825
- Yoder, P. R. 1995, *Mounting Lenses in Optical Instruments* (Washington: SPIE Press), pp.44-100