

다섯 개의 평면경을 위한 IGRINS 미러 마운트 설계 IGRINS MIRROR MOUNT DESIGN FOR FIVE FLAT MIRRORS

오재석¹, 박 찬¹, 김강민¹, 천무영¹, 육인수¹, 오희영^{1,2}, 정의정^{1,3}, 유영삼¹, 이한신⁴, 이성호⁵

¹한국천문연구원, ²과학기술연합대학원대학교, ³경북대학교 대기원격탐사연구소,
⁴맥도날드천문대, ⁵주에스이랩

JAE SOK OH¹, CHAN PARK¹, KANG-MIN KIM¹, MOO-YOUNG CHUN¹, IN-SOO YUK¹,
HEEYOUNG OH^{1,2}, UEEJEONG JEONG^{1,3}, YOUNG SAM YU¹, HANSHIN LEE⁴, AND SUNGHO LEE⁵

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

²Korea University of Science and Technology, Daejeon 305-350, Korea

³Center for Atmospheric Remote Sensing (CARE), Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

⁴McDonald Observatory, University of Texas at Austin, TX 78712, USA

⁵Space Environment Laboratory, Inc., Seoul 135-816, Korea

E-mail: ojs001@kasi.re.kr

(Received November 04, 2014; Revised December 11, 2014; Accepted January 09, 2015)

ABSTRACT

The IGRINS is a near infrared high resolution spectrograph jointly developed by the Korea Astronomy and Space Science Institute and the University of Texas at Austin. We present design and fabrication of the optomechanical mount for the five mirrors, i.e., an input fold mirror, a slit mirror, a dichroic, and two camera fold mirrors. Based on the structure analysis and the thermal analysis of finite element methods, the optomechanical mount scheme satisfies the mechanical and the thermal design requirements given by the optical tolerance analysis. The performance of the fabricated mirror mounts has been verified through three IGRINS commissioning runs.

Key words: Instrumentation; spectrographs

1. 서론

적외선 분광기는 현대 천문우주 관측연구에서 필수적인 도구이다. 기존에 개발된 전통적인 적외선 고분산 분광기는 한 번에 한 개의 분광 차수만을 관측할 수 있는 한계가 있었다. 고분산을 얻기 위해 회절격자로 입사하는 빔의 크기가 커져야 하므로 대형의 회절격자를 필요로 하였다. 복사에 의한 열잡음을 줄이기 위해 전체 광학계와 마운트를 대형의 극저온 진공챔버 내에 설치해야 하므로, 장비가 대형화되고 제작 및 유지 비용이 높아지는 문제점이 있었다. 장비의 무게가 무거워지기 때문에 망원경의 초점면에 장비를 직접 부착하지 못하고 릴레이 광학계 또는 광섬유 장치를 이용하여 빛을 유도해야 한다. 이러한 과정에서 빛의 손실을 피할 수 없다.

2009년도부터 한국천문연구원은 미국 텍사스 대학교와 공동으로 담금격자 적외선 고분산 분광기인 IGRINS(Immersion GRating INfrared Spectrometer)의 개발

을 시작하였고, 5년 후인 2014년 초에 천체의 ‘퍼스트 라이트’ 관측에 성공하였다.

앞서 서술한 기존의 고분산 분광기의 문제점을 해소하기 위해, IGRINS는 실리콘 담금격자(immersion grating)를 주분산 격자로 채택하였다. 유리 재질의 기존의 회절격자와는 달리, 실리콘 담금격자에서는 분광의 회절현상이 유리 매질보다 굴절률이 큰 실리콘 ($n = 3.4$) 매질내부에서 발생하므로 격자로 입사하는 빔의 크기가 작아도 높은 분해능($R = 40,000$)을 얻을 수 있다. 이에 따라 광학계 및 마운트를 소형화할 수 있으므로, 분광기 장비의 부피 및 무게를 기존 대비 1/10 이하로 대폭 줄일 수 있다. 무게의 경량화로 분광기를 망원경의 초점면에 직접 부착할 수 있으므로 광 손실을 줄일 수 있고 그 만큼 기기의 감광효율을 높일 수 있게 되었다. 또한, 교차분산 방식을 이용하여 전체 파장 영역을 한 번에 관측할 수 있기 때문에 관측 자료 생산성

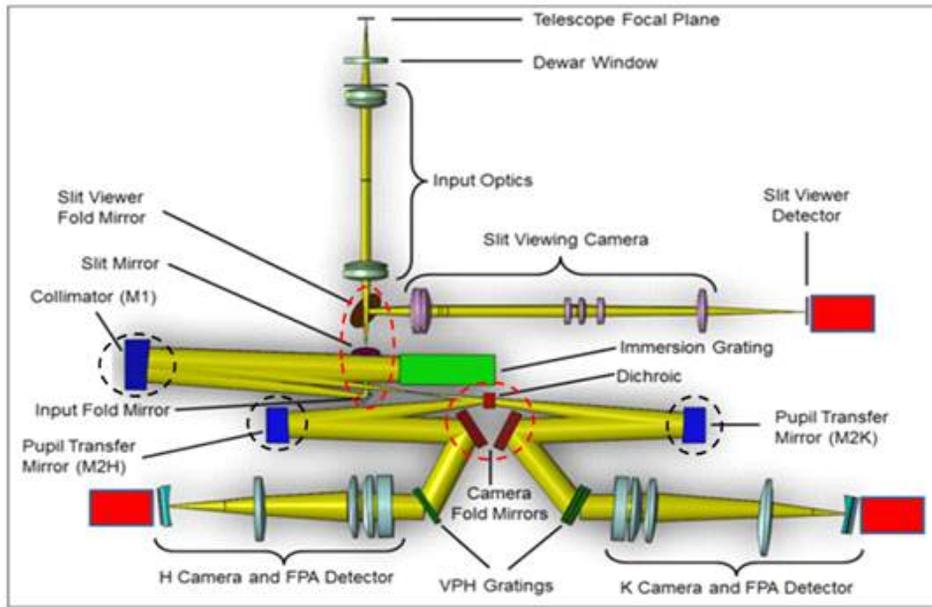


Figure 1. Layout of the IGRINS optical design. Dashed red circles denote the five flat mirrors described in this paper.

이 매우 높을 뿐만 아니라 대상 천체의 변광 또는 지구 대기 영향을 변화 등의 요인에 대비하여 자료의 동시성을 보장한다. 시험관측 자료를 분석하여 성능을 평가한 결과, IGRINS는 근적외선과장 영역인 H밴드와 K밴드에서 전체 스펙트럼을 동시에 고분산으로 43개의 차수(H밴드: 23개의 차수, K밴드: 20개의 차수)를 관측할 수 있는 세계 최고 성능의 적외선 분광기이다(Yuk, I. -S. et al., 2010; Park, C. et al., 2014). 따라서 이제까지 시도하지 못했던 여러 가지 천문학 문제 해결에 활용될 수 있고, 새로운 천문학 연구 주제를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

IGRINS는 현재 미국 텍사스주 맥도날드천문대의 2.7 미터 HJS(Harlan J. Smith) 망원경에 설치되어 주로 별과 행성의 탄생 영역에 관련된 과학 연구를 수행하고 있다. Figure 1은 IGRINS의 광학 설계 레이아웃을 도시하고 있다(Park, C. et al., 2014). IGRINS 광학계는 크게, 전단광학계(input relay optics), 슬릿뷰카메라(slit-viewing camera) 및 H&K밴드 분광기 시스템으로 구성되어 있다. 분광기 시스템은 실리콘 담금격자, VPHG(volume phase holographic grating), H밴드 카메라와 그에 대응하는 검출기 및 K밴드 카메라와 그에 대응하는 검출기로 구성된다. 또한, 빛의 경로를 전환하는 광학 부품으로서, 9개의 미러, 즉 콜리메이터미러(M1), 2개의 퓨필트랜스퍼미러(M2H&K), 슬릿뷰어폴드미러, 인풋폴드미러, 슬릿미러, 다이크로익, 및 2개의 카메라폴드미러를 사용하고 있다.

Figure 2는 Figure 1에 도시된 광학 설계 레이아웃

에 기초하여 실제로 제작 완료되어 유틸리티벤치 상에 배치된 광학 부품들의 실제 모습을 도시하고 있다. Figure 1에서 흑색원으로 표시된 콜리메이터미러, 2개의 퓨필트랜스퍼미러, 및 슬릿뷰어폴드미러에 대한 광기계 마운트 설계는 Rukdee 등(2012)에 수록되어 있다. 본 연구에서는 나머지 5개의 미러, 즉, Figure 1에서 적색원으로 표시된 인풋폴드미러, 슬릿미러, 다이크로익 및 2개의 카메라폴드미러에 대하여 설계와 해석 및 제작 과정의 특징을 기술하고자 한다.

각 미러의 역할을 Figure 1의 광학 설계 레이아웃을 참고하여 간략하게 살펴보면, 슬릿 미러는 전단광학계를 통해 입사하는 빔을 슬릿뷰어폴드미러를 향해 반사시키고, 인풋폴드미러는 슬릿을 관통하여 입사하는 빔을 콜리메이터(M1)를 향해 반사시키는 역할을 수행한다. 다이크로익은 담금격자에서 분산되어 콜리메이터(M1)를 거쳐 입사하는 빔 중 K밴드는 투과시키고 H밴드는 반사시켜서 각각의 퓨필트랜스퍼미러(M2K, M2H)로 향하게 한다. 카메라폴드미러는 퓨필트랜스퍼미러로부터 입사하는 빔을 반사시켜 VPHG로 향하게 한다.

상술된 역할을 수행하기 위한 이들 미러의 광학 성능은 광학 설계로부터 부여되는 공차를 만족하도록 미러 마운트를 제작, 조립 및 정렬함으로써 보장될 수 있다. 공차에는 여러 종류가 있을 수 있지만, 미러의 광학 성능에 가장 큰 영향을 주는 것은 안정성 공차로서 크게 정렬 안정성 공차와 광학 컴포넌트 안정성 공차가 있다. 정렬 안정성 공차는 주로 중력 변화와 관련되어 있고, 광학 컴포넌트 안정성 공차는 미러를 지지하기

Table 1. Physical specification of the five mirrors

Component	Parameter	Specification
Input Fold Mirror	Diameter (mm)	12.50
	Thickness (mm)	3
	Clear Aperture (mm)	8.93
	Mass (g)	0.93
	Material	Zerodur
Slit Mirror	Length (mm)	30
	Width (mm)	19
	Thickness (mm)	0.5
	Slit size(mm x mm)	1.94 x 0.14
	Mass (g)	0.66
	Material	Silicon
Dichroic	Length (mm)	100
	Width (mm)	15
	Thickness (mm)	6
	Clear Aperture (mm)	84.95
	Mass (g)	19.8
	Material	Infrasil 301
Camera Fold Mirror (H&K)	Length (mm)	65
	Width (mm)	40
	Thickness (mm)	10
	Clear Aperture (mm)	57.78
	Mass (g)	63.72
	Material	Zerodur

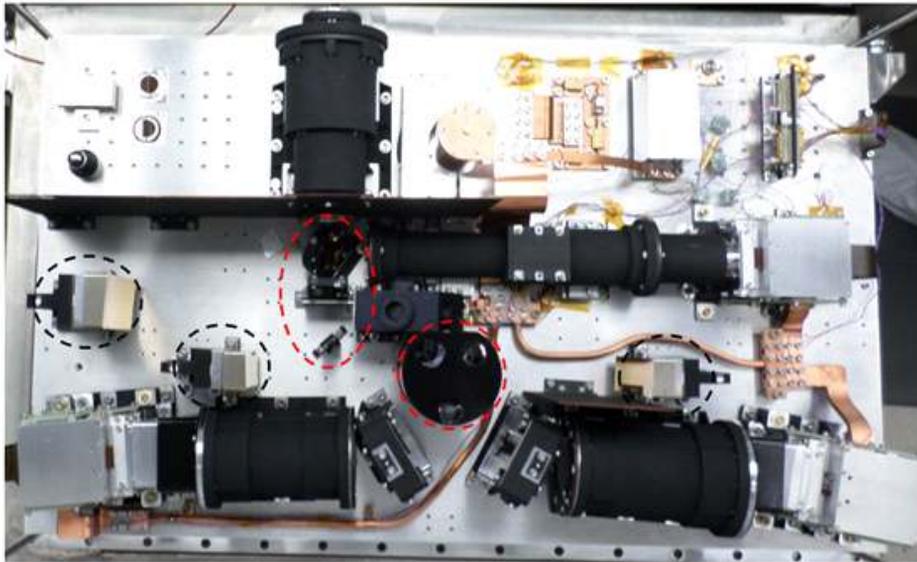


Figure 2. Interior layout of the IGRINS. Dashed red circles denote the mirror mounts fabricated and assembled on the optical bench.

위한 메커니즘과 관련되어 있다. 본 논문에서는 유한요소법에 의한 구조 해석 및 열 해석을 통해 중력 변형과 미러지지 메커니즘에 의한 미러 표면 변형이 안정성 공차를 만족하도록 다섯 개의 평면 미러들에 대한 마운트가 설계되었음을 서술한다.

2. 미러 마운트 모델 설계

Figure 1의 광학 설계 레이아웃에서 알 수 있듯이, 미러들은 협소한 영역에 배치되어 있다. 광학면의 유효 구경과 활용가능한 공간의 크기를 고려하여 각 미러의 치수가 최적화되어야 한다. Figure 3은 인풋폴드미러와 다

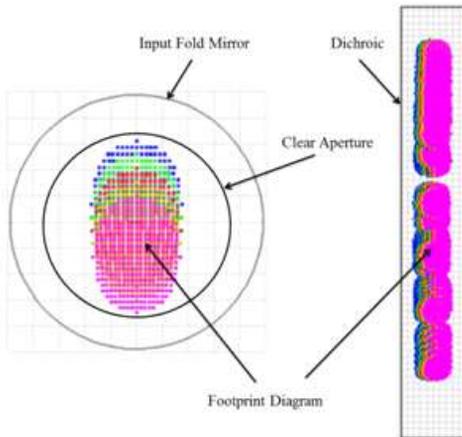


Figure 3. Clear Aperture (CA) on the input fold mirror (left) and the dichroic(right). The CA is determined by the maximum occupied footprint area on the mirror surface

이크로익에 맺히는 풋프린트(footprint)를 표시하고 있다. 풋프린트의 형상으로부터 유효 구경을 추정할 수 있다. Table 1에는 5개의 미러에 대한 물리적인 세부사항(치수, 유효 구경, 질량, 재질)이 요약되어 있다.

2.1. 인풋폴드미러 마운트

인풋폴드미러는 직경 12.5 mm, 두께 3 mm의 원형 평면경이다. 기본 재질은 제로듀어(Zerodur)이고, 경면에 골드층을 코팅함으로써 1.49 ~ 2.45 μm 의 파장 범위에서 97% 이상의 반사율을 갖도록 제작되었다. 슬릿미러 뒤쪽에 배치되어 전단광학계로부터 슬릿을 통과하는 빛을 반사시켜 콜리메이터로 향하게 하는 역할을 한다.

Figure 4는 인풋폴드미러 및 이것을 설치하기 위한 마운트 프레임의 전개도를 도시하고 있다. 높이 97 mm, 폭 16 mm, 두께 4.5 mm의 직육면체의 마운트 프레임의 상단부에는 원형 홈이 형성되어 있다. 인풋폴드미러는 원형 홈에 변형된 6점 지지(6-points kinematic mount) 방식으로 설치되어 있다. 원형 홈의 내부 테두리에 동일 간격으로 형성된 3개의 지점에 인풋폴드미러의 경면이 광축 방향으로 접촉된 상태에서, 이들 접촉점에 대응하는 인풋폴드미러의 반대면에 3개의 판 스프링(leaf spring)을 사용하여 힘을 가함으로써 인풋폴드미러가 광축 방향으로 고정된다. 판 스프링의 재질은 티타늄 합금 Ti-6Al-4V이다. Figure 4에 도시된 인풋폴드미러를 고정하기 위해 사용된 판 스프링을 자세히 살펴보면 길쭉한 직사각형 막대 형상을 가지며, 끝부분에 미러와 접촉하는 팁이 형성되어 있다. 미러와 접촉할 때 스프링의 팁 부분이 δ 만큼 변위되면, 이에 대응하는

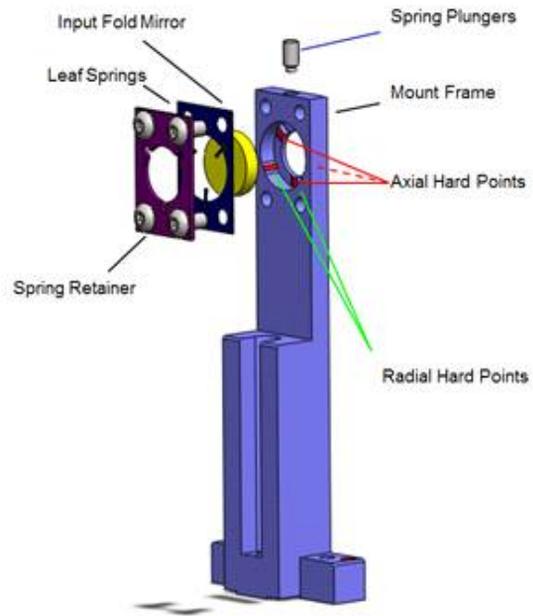


Figure 4. Input fold mirror and its mount. Hard points are indicated by red and a downward force is exerted on the lateral side of the input fold mirror by a spring plunger.

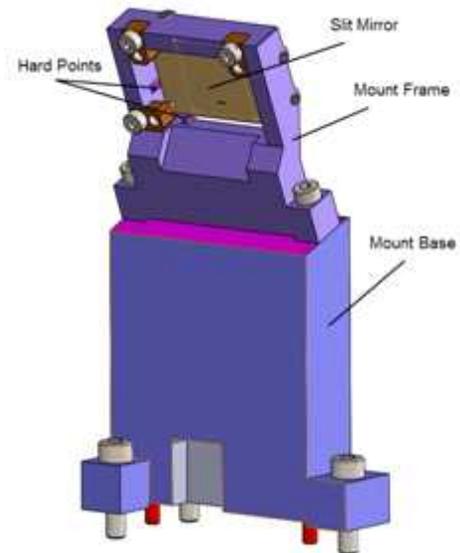


Figure 5. Slit mirror and its mount. The mount frame is inclined by 22.5° to the mount base.

다음 식의 탄성력 F 가 미러에 작용하게 된다(Avallone et al., 2007).

$$F = \frac{Ebh^3}{4L^3} \delta$$

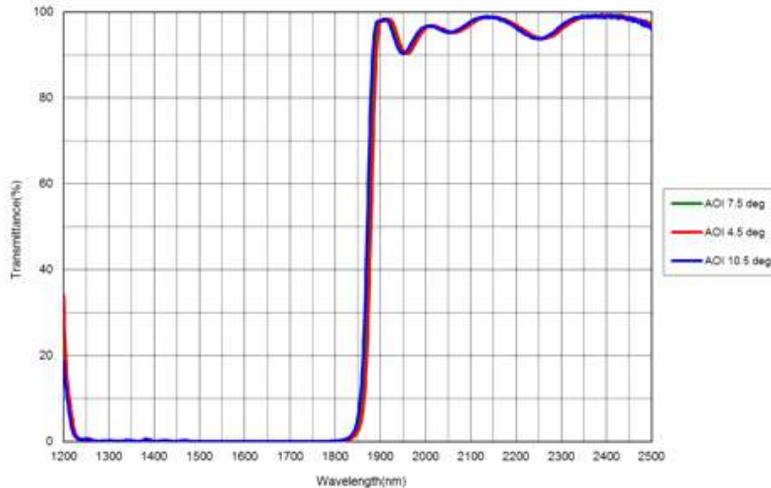


Figure 6. Transmittance of the dichroic with wavelength. Experimental results for three angles of incidence (AOI) are superposed.

여기에서 E 는 티타늄 합금 Ti-6Al-4V의 탄성 계수이고, b , h , 및 L 은 각각 직사각형 막대의 폭, 두께, 및 길이이다. 통상적으로 화물의 배송 시 제품에 직접 전달되는 최대 외부 충격은 대략 3 G 이다. 실제로 IGRINS의 운송 시 작용하는 외부 충격을 측정할 바 대부분 2 G 이하이었고, 트럭으로 옮겨 실는 과정에서 순간적으로 3 G 정도의 외부 충격이 가해짐을 알 수 있었다. 이와 같은 최대 외부 충격에 대비하여 판 스프링 각각은 인풋폴드미러에 대하여 3 G의 힘을 인가하도록 설계되어 있다. 또한, 판 스프링을 안전하게 고정시키고 보호하기 위해 스프링 리테이너가 부가되어 있다. 다음으로, 원형홈의 둘레에 형성된 2개의 접촉점에 인풋폴드미러의 둘레면이 탄젠트 접촉된 상태로, 스프링 플런저를 사용하여 위쪽 방향으로부터 힘을 인가함으로써 인풋폴드미러가 반지름 방향으로 고정된다. 스프링 플런저는 적당히 부드럽고 단단한 델린 팁(Delrin tip)을 갖고 있고, 무두볼트를 1 mm 삽입하면 3G 힘을 인가하도록 설계되어 있다. 직육면체마운트 프레임의 하단부는 2개의 핀을 사용하여 옵티컬벤치 상에 위치맞춤된 후, 볼트로 단단히 고정된다.

2.2. 슬릿미러 마운트

슬릿미러는 길이 30 mm, 폭 19 mm, 두께 0.5 mm의 직사각형 평면경이다. 기본 재질은 실리콘이고, 전단광학계를 통해 입사하는 빛을 반사시키기 위해, 슬릿미러의 경면은 실리콘 기판 상에 50 Å 두께의 크롬층과 900 Å 두께의 골드층이 순서대로 적층되어 있다. 크롬층은 골드층을 실리콘 기판에 접합하기 위해 사용된다. 슬릿미러의 경면에는 길이 1.939 mm, 폭 0.143 mm의 크기를

갖는 슬릿(slit)이 가공되어 있다. 슬릿의 폭과 길이는 경면의 앞에서 뒷면까지 45° 각도로 점진적으로 넓어지도록 가공하여(beveled) 슬릿 벽면에 의한 빛가림을 방지하였다. 전단광학계를 통해 입사하는 빛을 슬릿뷰어 폴드미러를 향해 반사시키기 위해, 슬릿미러의 경면은 옵티컬벤치의 수직면에 대해 22.5° 기울어져 있다. 따라서, 광축 방향에서 슬릿의 경면을 볼 때, 슬릿의 폭은 0.132 mm의 크기로 관측된다. 그 결과 IGRINS 분광기의 광축상에서 슬릿의 투영된 크기는 1.939 x 0.132 mm²이다.

Figure 5는 슬릿미러와 이를 설치하기 위한 마운트 어셈블리를 보여준다. 마운트 어셈블리는 22.5° 경사면을 갖는 베이스 프레임과 수직면을 갖는 마운트 프레임으로 분리하여 제작 시 각도 정밀도를 구현하기 편하도록 하였다. 베이스 프레임은 인풋폴드미러와 마찬가지로, 2개의 핀을 사용하여 옵티컬벤치 상에 위치맞춤된 후, 볼트를 사용하여 단단하게 고정된다. 마운트 프레임도 역시 2개의 핀을 사용하여 베이스 프레임의 경사면에 위치맞춤된 후, 볼트를 사용하여 고정되도록 설계되었다. 슬릿미러는 마운트 프레임의 직사각형 홈에 6 점 지지방식으로 고정된다. 직사각형 홈의 바닥면에 위치한 3개의 접촉점에 슬릿미러의 후면이 광축 방향으로 접촉된다. 이들 접촉점에 대응하는 슬릿미러의 경면 앞부분에 3개의 스프링 플런저를 사용하여 힘을 가함으로써 슬릿미러가 광축 방향으로 고정된다. 다음으로, 직사각형 홈의 내부 측면에 준비해 둔 2개의 접촉점에 슬릿미러의 측면이 접촉된다. 이들 접촉점에 대응하는 실리콘 기판 반대면에 2개의 스프링 플런저를 사용하여 슬릿미러를 측면에서 고정시킨다. 마지막으로, 직사각형 홈의 내부 아래쪽 측면에 형성된 1개의 접촉점에 대해

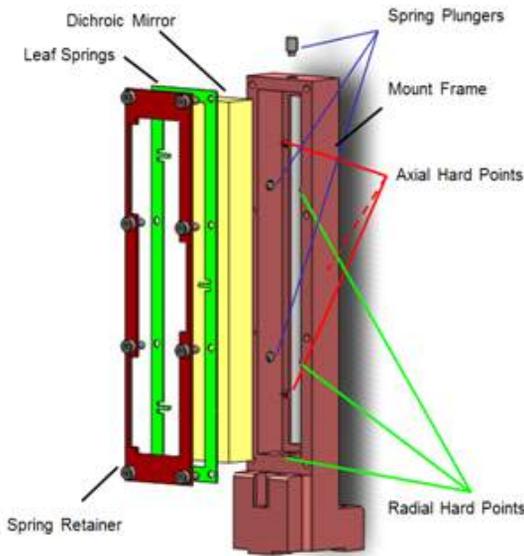


Figure 7. Dichroic and its mount. Leaf spring indicated by green exerts forces on the surface of the dichroic.

1개의 스프링 플런저를 사용하여 실리콘 기판 위쪽 방향에서 힘을 가하여 슬릿미러의 고정을 완료한다.

2.3. 다이크로익의 마운트

다이크로익은 H밴드에서는 빛을 반사하는 미러이고, K밴드에서는 빛을 투과시키는 필터 역할을 하는 광학부품이다. IGRINS에 사용된 다이크로익은 길이 100 mm, 폭 15 mm, 두께 6 mm의 크기를 갖는 직육면체 형상이고, 그 재질은 Infrasil-301이다. Figure 1의 광학 설계 레이아웃에서 알 수 있듯이, 다이크로익은 담금격자와 2개의 카메라폴드미러 사이에 위치되어 있고, 담금격자에 의해 분산된 후 콜리메이터미러를 거쳐 입사하는 빛 중 H밴드(1.4 ~ 1.85 μm)의 빛은 평균 98% 이상 반사시켜 퓨필트랜스퍼미러로 보내고, K밴드(1.91 ~ 2.5 μm)의 빛은 평균 98% 이상 투과시켜 퓨필트랜스퍼미러로 보내는 역할을 한다. Figure 6은 입사각 4.5° (적색 곡선), 7.5° (녹색 곡선) 및 10.5° (청색 곡선)에 대하여, 파장에 따른 다이크로익의 투과율을 도시하고 있다. 다이크로익은 H밴드(1.4 ~ 1.85 μm)의 빛에 대해 2% 이하의 절대 투과율을 나타내고 있다. K밴드(1.91~2.5 μm)의 빛에 대해서는 90% 이상의 절대 투과율을 보여주고 있다.

Figure 7은 다이크로익 및 이것을 설치하기 위한 마운트 프레임의 전개도를 도시하고 있다. 높이 131 mm, 폭 24 mm, 두께 11.5 mm의 직육면체의 마운트 프레임에 한 변의 길이가 긴 직사각형 홈이 형성되어 있다. 다이크로익은 직사각형 홈에 6점 지지 방식으로 고

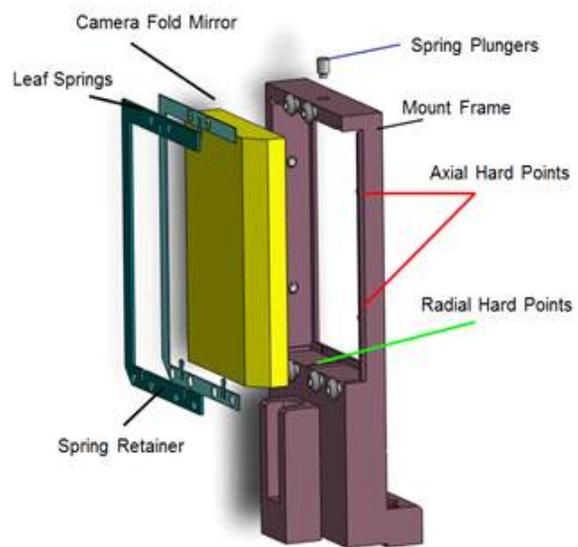


Figure 8. Camera fold mirror and its mount. One side of the mirror is cut to prevent the beam path from being blocked.

정되어 있다. 직사각형 홈의 바닥면에 위치한 3개의 접촉점에 대하여 반대면에서 3개의 판 스프링을 사용하여 다이크로익을 광축 방향으로 고정한다. 광축에 수직인 측면 방향에 대해서는 Figure 5의 슬릿미러를 위한 마운트 프레임에서와 마찬가지로, 직사각형 홈의 내부 측면과 아래쪽 면에 형성된 3개의 접촉점에 대해 각각 대응되는 스프링 플런저를 사용하여 다이크로익을 광축에 수직인 방향으로 고정시킨다.

다이크로익 마운트 프레임은 옵티컬벤치 상에 직접 고정되지 않고 후술하는 바와 같이 2개의 핀을 사용하여 다이크로익 베이스 플레이트에 고정된 다음 베이스 플레이트가 옵티컬벤치 위에 직접 고정되는 방식을 취하고 있다.

2.4. 카메라폴드미러 마운트

카메라폴드미러는 H채널과 K채널에 각각 배치되는 미러가 동일하기 때문에, H채널과 K채널을 구분하지 않고 서술한다. 카메라폴드미러는 길이 65 mm, 폭 40 mm, 두께 10 mm의 치수를 갖는 직육면체 형상의 평면경이다. 인풋폴드미러와 마찬가지로, 기본 재질은 제로 듀어이고, 경면에 골드층을 코팅함으로써 1.49 ~ 2.45 μm 의 파장 범위에서 97% 이상의 반사율을 갖도록 제작되었다. 퓨필트랜스퍼미러를 거쳐 입사하는 빛을 반사시켜 VPH(volume phase holographic) 격자로 입사시키는 역할을 한다. 다이크로익을 거쳐 퓨필트랜스퍼미러(M2H&K)로 입사되는 빛이 차단되지 않도록 카메라폴

Table 2. Alignment stability tolerances & Assembly tolerances of the mirrors

Component	Parameter	Stability tolerance	Assembly tolerance
Input Fold Mirror	Tip/Tilt	± 15 (arcsec)	± 3 (arcmin)
	Separation (μm)	± 5 (to M1)	± 100 (to M1)
Slit Mirror	Decenter (μm)	± 10	± 100
	Tip/Tilt	± 10 (arcsec)	± 3 (arcmin)
	Separation (μm)	± 10 (in absolute defocus)	± 100
Dichroic	Tip/Tilt	± 15 (arcsec)	± 3 (arcmin)
	Separation (μm)	± 5 (from M1)	± 100 (from M1)
Camera Fold Mirror	Tip/Tilt	± 15 (arcsec)	± 3 (arcmin)
	Separation (μm)	± 5 (to VPHG)	± 100 (to VPHG)

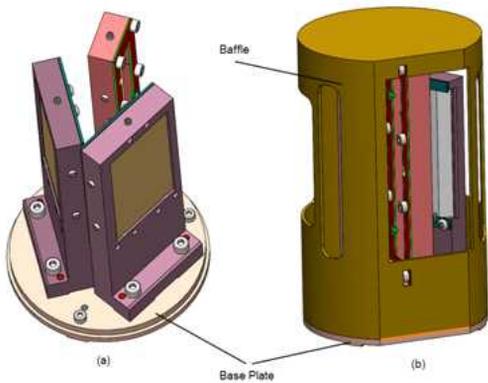


Figure 9. Dichroic base plate assembly. Dichroic mount and two camera fold mirror mount are placed on the base and surrounded with a cylindrical cover.

드미러의 한쪽 변은 비스듬히 절단되어 있다.

Figure 8은 카메라폴드미러와 이를 설치하기 위한 마운트 프레임의 전개도를 도시하고 있다. 높이 114 mm, 폭 47 mm, 두께 11.5 mm의 치수를 갖는 직육면체 형상의 마운트 프레임에 직사각형 홈이 형성되어 있다. 카메라폴드미러는, 다이크로익과 마찬가지로, 6점 지지 방식으로 직사각형 홈에 고정된다. 광축 방향으로 3개의 판 스프링을 사용하고 광축에 수직인 방향으로 3개의 스프링 플런저를 이용하여 광학 부품을 고정하였다.

카메라폴드미러 마운트 프레임은다이크로익의 마운트 프레임과 마찬가지로 옵티컬벤치상에 직접 고정되지 않고 2개의 도웰핀을 사용하여 다이크로익 베이스 플레이트에 고정되고이 베이스 플레이트가 옵티컬벤치 위에 고정되는 방식을 취하고 있다.

2.5. 다이크로익 베이스 어셈블리

다이크로익과 2개의 카메라폴드미러는 매우 좁고 밀집한 구역에 설치되어야 하기 때문에, 개별적으로 핀을 사용하여 옵티컬벤치 상에 직접 고정하는 것보다는

Figure 9(a)와 같이 3개의 광학 부품을 다이크로익 베이스 플레이트에 고정한 후, 베이스 플레이트를 옵티컬벤치상에 고정하는 것이 작업 및 유지 보수의 관점에서 효율적이다.

Figure 9(b)와 같이 다이크로익 베이스 어셈블리는 베이스 플레이트와 배플로 구성되어 있다. 베이스 어셈블리의 재질은 옵티컬벤치와 동일한 알루미늄 6061-T6이다. 베이스 플레이트는 직경 90 mm, 두께 7 mm의 원반 형상이고, 3개의 광학 부품을 고정하기 위한 핀 구멍들이 가공되어 있다. 베이스 배플은 높이 140 mm, 직경 90 mm, 두께 1.5 mm를 갖는 원통 형상이다. 배플의 둘레에는 빛의 경로를 차단하지 않도록 직사각형의 구멍들이 형성되어 있다.

3. 안정성 공차 및 구조해석

광학 기기는 그 성능을 보장하기 위해 광학 설계로부터 부여되는 공차를 만족시키도록 제작되어야 한다. 광학 기기의 공차는 조립전 공차와 조립후 공차로 나눌 수 있다. 조립전 공차에는 제작 공차와 정렬(조립) 공차가 포함되고, 조립후 공차에는 안정성 공차가 포함된다. 제작 공차는 마운트 설계와 관련하여 직접적인 쟁점이 없으므로 여기에서는 기술하지 않는다. IGRINS에서 미러들에 대한 정렬 공차는 중심 축의 디센터(decenter)와 광학부품들 간의 세퍼레이션(separation)에 대해 $\pm 100 \mu\text{m}$, 팁-틸트(tip-tilt)에 대해 $\pm 3'$ (각분)이고, Table 2에 정리되어 있다. 정렬 공차는 $\pm 10 \mu\text{m}$ 의 정밀도로 기계 가공된 위치고정 핀을 활용하여 만족시킬 수 있었다.

안정성 공차는 정렬 안정성 공차와 광학 컴포넌트 안정성 공차로 나눌 수 있다. 본 논문에서 다루고 있는 미러들은 모두 평면경이다. 다이크로익은 그 표면이 평평하므로 평면경으로 간주할 수 있다. 평면경의 경우 정렬 안정성에는 중력에 의한 휘어짐이 지배적인 영향을 주고 광학 컴포넌트 안정성에는 미러를 지지하기 위해 가하는 스프링에 의한 힘(preload)이 큰 영향을 미친다.

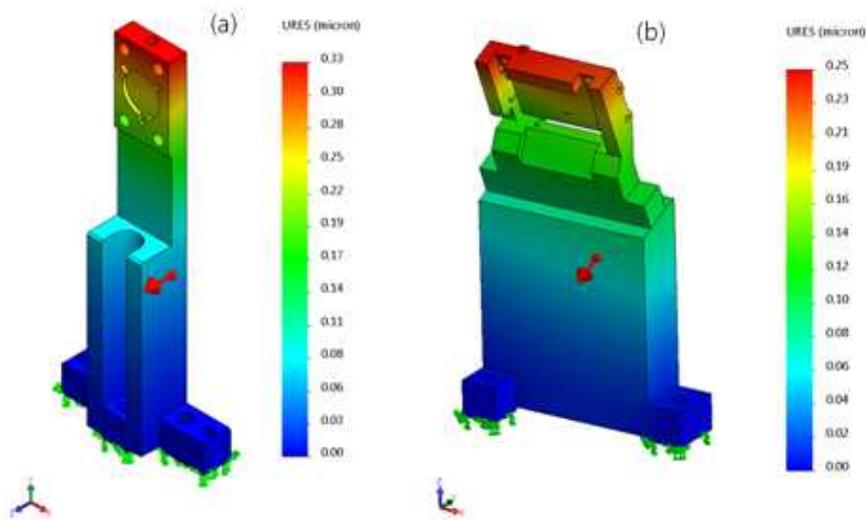


Figure 10. Displacement distribution due to 1 G gravity: (a) Input fold mirror mount; and (b) Slit mirror mount. The red arrow represents the direction of the gravity and the group of small green arrows represents the fixture of the bottom.

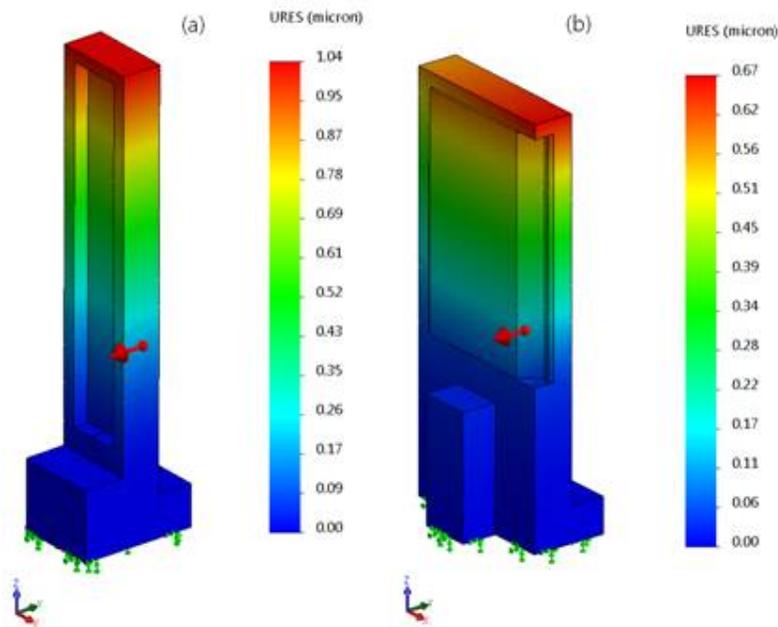


Figure 11. Displacement distribution due to 1G gravity: (a) Dichroic mount (b) Camera fold mirror mount. The red arrow represents the direction of the gravity and the group of small green arrows represents the fixture of the bottom.

3.1. 정렬 안정성 공차

IGRINS는 망원경의 초점면에 부착되어 관측시 망원경과 함께 움직이도록 되어 있다(Park et al., 2014). 중력 방향의 변화에 따라 마운트 구조물이 휘어지게 된다. 광학 설계에 의해 부여되는 요구조건에 따르면 한 시간

노출 또는 최고 15°의 고도 변화 동안 중력에 의한 휘어짐의 영향이 정렬 안정성 공차보다 작아야 한다. 5개의 미러에 부여된 정렬 안정성 공차는 Table 2에 정리되어 있다.

Figure 10(a), 10(b), 11(a) 및 11(b)는 각각 수직한

Table 3. Optical component stability tolerances of the mirrors

Component	Parameter	Tolerance
Input Fold Mirror	Surface figure($\lambda 632.8$ nm)	$\lambda/10$
Slit Mirror	Surface figure($\lambda 632.8$ nm)	3 μm (p-p sag)
Dichroic	Surface figure($\lambda 632.8$ nm)	$\lambda/10$
Camera Fold Mirror (H&K)	Surface figure($\lambda 632.8$ nm)	$\lambda/10$

1 G 중력에 의해 발생하는 인풋폴드미러, 슬릿미러, 다이크로익, 및 카메라폴드미러의 변위 분포를 SolidWorks Simulation[®]을 사용하여 얻은 결과들이다. 적색 화살표는 1 G 중력이 마운트에 대해 작용하는 방향을 나타내고, 연두색 작은 화살표들은 마운트의 바닥이 움직이지 않게 고정되어 있는 구속조건을 나타낸다. 각 Figure의 좌측 아래 구석에는 xyz 축을 나타내는 좌표계가 표시되어 있다. 옵티컬벤치에 수직한 면을 기준면으로 할 때, 마운트에 중력이 작용하지 않으면, 마운트는 기준면에 대해 기울어지지 않는다. 그렇지만, Figure 10(a)에 적색 화살표로 나타낸 중력이 작용하면, 마운트는 기준면에 대해 기울어지게 된다. 따라서, 마운트의 높이에 대한 마운트의 최대 변위를 중력에 의한 틸트각으로 정의할 수 있다.

인풋폴드미러 마운트 프레임의 최대 변위는 0.66 μm 이고, 인풋폴드미러 마운트프레임의 높이는 97 mm 이므로, 틸트각은 $0.66 \mu\text{m}/9.7 \times 10^4 \mu\text{m} = 1.4''$ (각초)로 계산된다. 최대 변위와 틸트각은 틸-틸트 안정성 공차 $\pm 15''$ 및 세퍼레이션 안정성 공차 $\pm 5 \mu\text{m}$ 보다 충분히 작은 값이므로 인풋폴드미러 마운트 설계는 정렬 안정성 요건을 만족한다.

슬릿미러의 경우, 중력 방향에 따른 최대 변위는 0.26 μm 이고, 마운트 프레임의 높이가 102.5 mm 이므로, 틸트각은 0.5'' 이다. 슬릿미러의 틸-틸트 안정성 공차는 $\pm 10''$, 세퍼레이션 및 디센터 안정성 공차는 각각 $\pm 10 \mu\text{m}$ 이므로 슬릿미러 마운트 설계 또한 정렬 안정성 요구조건을 만족한다.

다음으로 다이크로익의 경우, 중력 방향에 따른 최대 변위는 1.35 μm 이다. 다이크로익 마운트 프레임의 높이는 131 mm 이므로, 틸트각은 2.1'' 이다. 다이크로익의 틸-틸트 및 세퍼레이션 안정성 공차는 각각 $\pm 15''$ 와 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이므로, 다이크로익 마운트 설계 역시 정렬 안정성 요구조건을 잘 만족함을 보여준다.

마지막으로 카메라폴드미러의 경우, 중력에 의한 휨 효과의 최대 변위는 0.84 μm 이다. 카메라폴드미러 마운트 프레임의 높이는 114 mm 이므로, 틸트각은 1.5''로 계산된다. 카메라폴드미러의 틸-틸트 및 세퍼레이션 안정성 공차는 각각 $\pm 15''$ 와 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이므로 카메라폴드미러 마운트 설계 또한 정렬 안정성 공차 요구조건을 넉넉하게 잘 만족한다.

3.2. 광학 컴포넌트 안정성 공차

광학 컴포넌트 안정성의 척도는 표면형상 불규칙도(surface figure irregularity)이다. 표면형상 불규칙도가 기준이 되는 표면형상으로부터 벗어나는 정도를 피크-투-밸리(P - V) 또는 RMS(root-mean-square)로 표현한다. IGRINS 광학 설계에 의해 부여된 표면형상 공차는 63 nm(RMS) 이다. 이것은 판 스프링 또는 스프링 플런저에 의해 발생하는 경면 형상의 왜곡(distortion)이 63 nm 보다 작아야 함을 의미한다. 이러한 컴포넌트 안정성 공차는 Table 3에 정리되어 있다.

인풋폴드미러와 카메라폴드미러의 표면 형상 가공 공차는 각각 $\lambda/8$ 이하이고, 미러 제작자로부터 받은 측정 시험성적서에 따르면, 인풋폴드미러의 표면 형상정밀도는 0.089 λ (PV) 및 0.017 λ (RMS)이고, 카메라폴드미러의 표면 형상정밀도는 0.120 λ (PV) 및 0.025 λ (RMS)이다. 다이크로익의 경우, 표면 형상 가공 공차는 6 λ (PV) 및 0.5 λ (RMS) 이하이다. 측정 시험성적서에 따르면, 0.914 λ (PV) 및 0.257 λ (RMS)이다.

상술된 표면 형상 가공 공차는 미러를 가공할 때 만족해야 하는 공차이고, 컴포넌트 안정성 공차는 미러를 마운트하기 위해 스프링에 의해 가해지는 힘에 의해 발생하는 표면 형상 변형이 만족해야 하는 공차이므로, 양자는 분명하게 구분된다.

Figure 12, 13, 14, 및 15는 각각 인풋폴드미러, 슬릿미러, 다이크로익, 및 카메라폴드미러에 대하여, 3개의 접촉점(hard contact point)에 대응하는 반대면에 3개의 스프링을 사용하여 각각 3 G의 힘을 광축 방향으로 주었을 때 발생하는 경면 표면의 변형을 나타낸다. 경계조건으로서 3개의 접촉점에 대응하는 미러의 표면이 움직이지 않도록 고정하였다.

경면 변형이 큰 다이크로익을 대표적으로 살펴보면, 최대 변형이 12 nm 정도이고, 최소는 제로이므로, 피크-투-밸리는 12 nm이다. 일반적으로 RMS는 피크-투-밸리의 1/3 정도이므로 다이크로익의 표면형상 불규칙도는 RMS 4 nm로 추정할 수 있다. 이 값은 표면형상 공차 63 nm에 훨씬 미치지 못하므로 다이크로익 마운트 설계는 광학 컴포넌트 안정성 공차를 만족한다. 인풋폴드미러, 슬릿미러, 및 카메라폴드미러의 마운트 설계도 역시 광학 컴포넌트 안정성 공차를 만족시킨다는 점을 용이하게 알 수 있다.

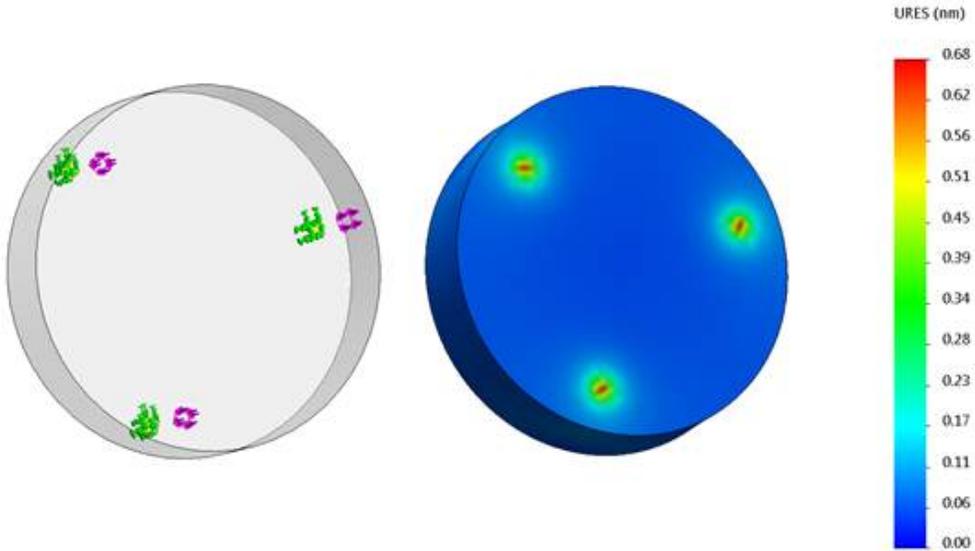


Figure 12. Surface distortion of the input fold mirror due to leaf springs. Left drawing represents the boundary conditions. Small green arrows indicate the fixture and red arrows denote the 3G spring forces exerted on the mirror rear surface.

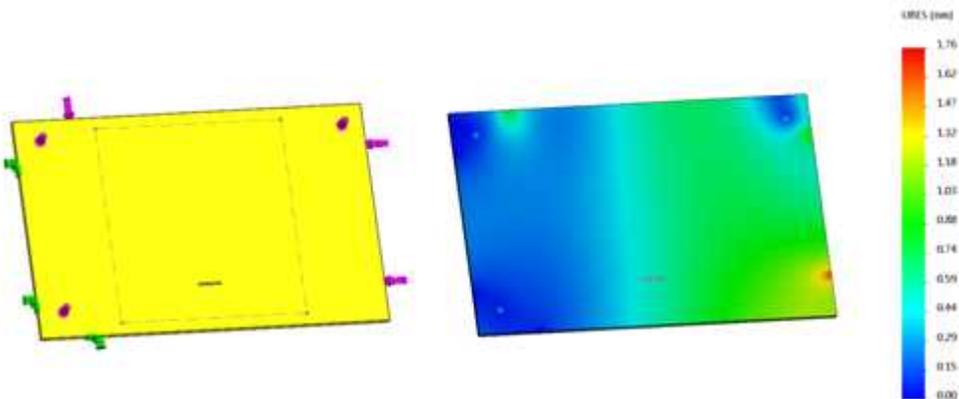


Figure 13. Surface distortion of the slit mirror due to leaf springs. Left drawing represents the boundary conditions. Small green arrows indicate the fixture and red arrows denote the 3G spring forces exerted on the slit surfaces.

4. 열해석

SolidWorks Simulation®을 활용하여 광학 부품들의 온도 분포 및 온도 행동을 살펴본다. 먼저 열 모델 및 경계 조건을 설명하고, 다음으로 계산 결과를 논의한다.

4.1. 열 모델 및 경계조건

Figure 16은 본 연구에 사용된 열 모델 및 경계조건을 도시하고 있다. 열 모델은 옵티컬벤치, 복사차단막, 카메라폴드미러 및 그의 마운트로 구성되어 있다. 인풋폴

드미러, 슬릿 미러, 및 다이크로익은 카메라폴드미러와 외부환경이나 마운트 방식이 유사하기 때문에, 열 모델에는 카메라폴드미러 한가지만 그림으로 보였다.

카메라폴드미러 및 마운트의 온도 행동 및 열평형 상태에서의 온도 분포를 계산하기 위해, 본 연구에서는 옵티컬벤치와 복사차단막은 각각 초기온도 300 K로부터 IGRINS 극저온장치에 대한 이전 연구에 의해 주어진 온도 변동(Oh et al., 2014)에 맞추어 최종 열평형 온도 125 K 및 130 K까지 냉각되는 것으로 도입하였다.

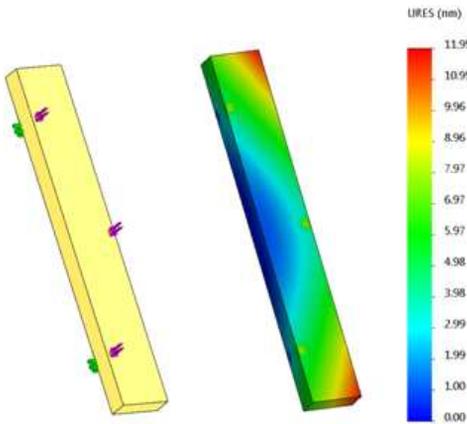


Figure 14. Surface distortion of the dichroic due to leaf springs. Left drawing represents the boundary conditions. Small green arrows indicate the fixture and red arrows denote the 3G spring forces exerted on the surface of the dichroic.

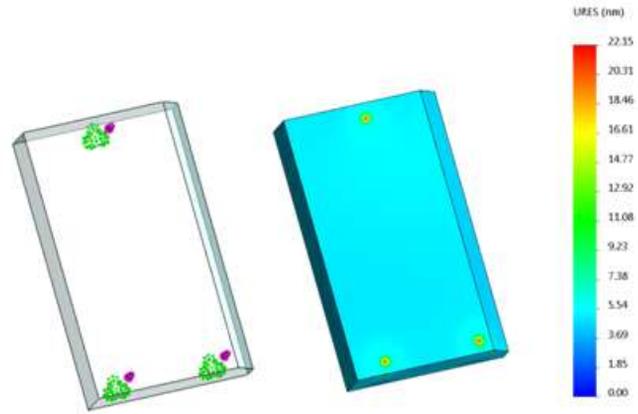


Figure 15. Surface distortion of the camera fold mirror due to leaf springs. Left drawing represents the boundary conditions. Small green arrows indicate the fixture and red arrows denote the 3G spring forces exerted on the rear surface of the mirror.

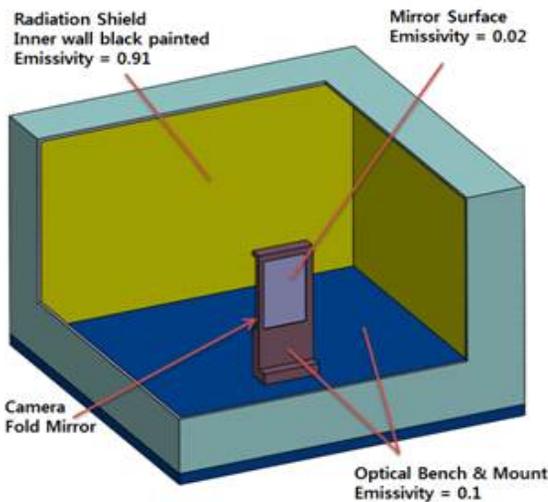


Figure 16. Thermal analysis model and boundary conditions. Conduction through optical bench surface and radiation from inner surfaces of the radiation shield are major mechanisms to govern the thermal system.

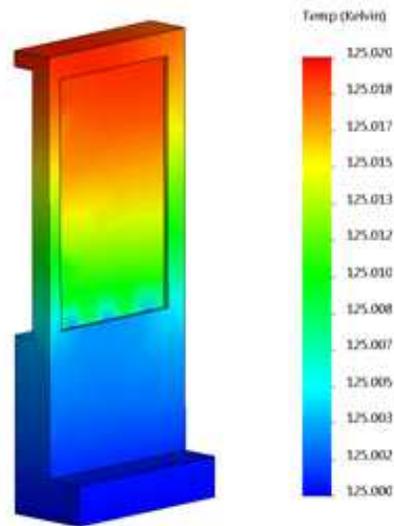


Figure 17. Temperature distribution over the mirror surface in the thermal equilibrium states. Left drawing represents the boundary conditions. Temperature difference across the mirror is roughly 0.02 K.

또한, 스프링 플런저에 의한 전도, 옵티컬벤치와 복사차단막의 온도기울기 효과 등의 미미한 요소들은 무시하였다. 복사차단막의 다섯 개의 내면(적외선 흡수페인트, 방사율 0.91), 옵티컬벤치의 윗면(방사율 0.10), 미러 표면(방사율 0.02), 및 미러 마운트 표면(방사율 0.10) 사이에서의 복사에 의한 열 교환을 계산에 포함하였다.

4.2. 카메라폴드미러의 온도 행동

Figure 17은 최종 열평형 상태에서 카메라폴드미러와 마운트의 온도 분포를 보여준다. 열 수축에 의해 발생하는 거리의 불확실성을 통상적인 10 μm 제작 공차 이내로 유지하기 위해, IGRINS 광학 부품은 거리 100 mm 당 4 K 이내의 온도 기울기를 만족해야 한다. 계산

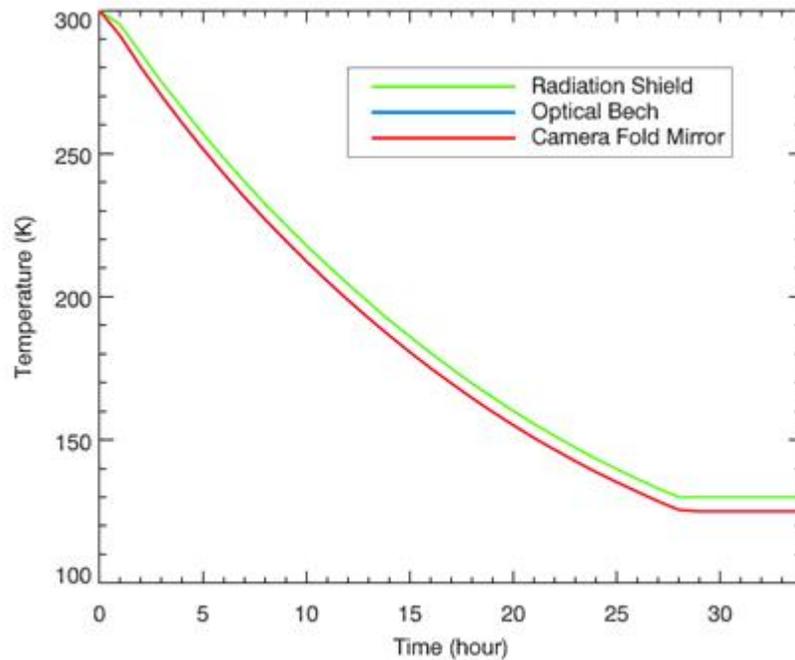


Figure 18. Temperature temporal variation of the camera fold mirror and its mount. Virtually the mirror are thermally following the optical bench in real time.

결과에서 알 수 있듯이, 카메라폴드미러는 길이 65 mm에 걸쳐 대략 0.02 K의 온도 차이를 보이므로, 상술된 IGRINS 시스템 온도 요건을 충분히 만족한다.

Figure 18은 극저온 냉각 동안 카메라폴드미러의 온도 변동을 옵티컬벤치 및 복사차단막의 온도 변동과 함께 도시하고 있다. 초기 온도 300 K로부터 최종 열평형 온도 125 K에 걸쳐 카메라폴드미러의 온도 행동은 옵티컬벤치를 실시간으로 추종하는 것을 알 수 있다. 두 부품간의 온도 차이는 0.01 K 이하이기 때문에 적색 곡선(카메라폴드미러)과 청색 곡선(옵티컬벤치)이 중첩되어 표시되어 있다. 따라서, IGRINS 광학 부품은 최종 열평형 상태에서 120 K와 130 K 사이에서 1 K(RMS)의 안정도로 유지되어야 한다는 IGRINS 시스템 온도 요건을 충족한다.

5. 결론

본 논문에서는 IGRINS 분광기에서 사용 중인 5개의 미러, 즉 인포폴드미러, 슬릿미러, 다이크로익, 및 H&K 카메라폴드미러를 설치하기 위한 광기계 마운트 설계를 서술하고 있다. 10 μm 의 공차로 제작된 핀을 사용하여 기계적 정렬 요구조건을 만족시킬 수 있었다. SolidWorks Simulation[®]을 활용한 유한요소방법에 따르면, 수직 방향으로 작용하는 자체 중력에 의한 미러와 마운트의 휘어짐은 정렬 안정성 공차를 충분히 잘 만족

하였으며 미러를 고정하기 위한 각각의 스프링에 의해 가해진 3 G 힘에 의한 표면형상 불규칙도 역시 광학 컴포넌트 안정성 공차보다 작았다. 따라서 5개의 미러들을 위한 광기계 마운트 설계는 광학 설계에서 요구한 기계 공차들을 모두 만족한다. 유사한 방법으로 수행한 열 해석 결과에 따르면, 미러들에 대한 광기계 마운트는 IGRINS 시스템 온도 요구조건 또한 잘 만족한다. 각각의 미러 마운트들은 설계대로 제작되었으며 그 결과는 세 번의 시험관측을 통해 검증되었다(Park, C. et al., 2014).

ACKNOWLEDGEMENT

This design work has been accomplished based on many previous instrument heritages. The authors are pleased to acknowledge the kind technological consultation of the IRTF (NASA Infrared Telescope Facility) instrument group at the University of Hawaii and the APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) instrument team at the University of Virginia. We also thank Daniel T. Jaffe for planning and leading the whole IGRINS project.

REFERENCES

- Avallone, E. A., Baumeister, T. III, & Sadegh, A. M., 2007, Mark's Standard Handbook for Mechanical

- Engineers, 11thed. (Mc Graw-Hill, NewYork), pp.5-22
- Oh, J. S., Park, C., Cha, S. -M., et al., 2014, Detector Mount Design for IGRINS, JASS, 31, 177
- Park, C., Jaffe, D. T., Yuk, I. -S., et al., 2014, Design and Early Performance of IGRINS (Immersion Grating Infrared Spectrometer), Proc. SPIE, 9147
- Rukdee, S., Park C., Kim, K. -M., et al., 2012, IGRINS Mirror Mount Design for Three Off-axis Collimators and One Slit-viewer Fold Mirror, JASS, 29, 233
- Yuk, I. -S., Jaffe, D. T., Barns, S., et al., 2010, Preliminary Design of IGRINS (Immersion GRating INfrared Spectrograph), Proc. SPIE, 7735