

제임스 웹 우주망원경(James Webb Space Telescope)[2]

2022년 8월 24일

손상모



들어가며

지난 글에서는 웹 우주망원경의 개발 역사와 망원경을 작동하는 데 필요한 구성 요소들에 대해 살펴보았다. 이번 글에서는 웹 우주망원경이 최상의 관측기기로 작동하기 위한 준비 과정에 대해 알아보기로 한다.

웹 우주망원경의 커미셔닝 (작동 준비 과정)

망원경을 설치한 후 작동을 위해 준비하는 과정을 통상 '커미셔닝^{commissioning}' 이라고 부른다. 웹 우주망원경의 커미셔닝은 크게 세 단계로 나뉜다. 제1단계에서는 발사 이후 목적지인 L2점까지 날아가는 동안 접혀 있던 망원경의 구성 요소들 (태양전지판, 통신 안테나, 태양 차단막, 거울 등)을 전개해서 온전한 모습을 갖췄다. 망원경이 L2에 도착한 직후부터 제2단계인 거울 정렬^{mirror alignment} 과정이 약 3개월에 걸쳐 진행됐는데, 웹 우주망원경의 거울은 18개의 조각으로 이루어져 있어서 하나의 거울인 것처럼 작동하게 만들어줘야 하는 이 과정을 거울 정렬이라고 부른다. 그리고, 마지막

제3단계인 기기 캘리브레이션^{instrument calibration} 과정까지 모두 마치고 망원경의 완전한 준비 완료가 선언되었다. 이렇게 총 세 단계의 커미셔닝 기간을 마친 웹 우주망원경은 본격적인 과학 관측에 돌입하였다. 망원경 성능을 결정짓는 가장 중요한 거울 정렬 과정에 대해 살펴보기로 한다.

거울 정렬의 원리

빛이 망원경의 거울에 반사된 후 정확하게 한 점에 모여야 거울이 제 역할을 하게 된다. 그러기 위해서는 거울의 표면이 완벽에 가깝게 고른 포물면^{parabola}이어야 한다. 표면에 흠이 있거나 울퉁불퉁하면 그만큼 들어오는 빛이 산란하여 망원경의 성능이 떨어진다. 특히 망원경이 관측하는 빛의 파장보다 거울 표면의 들쭉날쭉한 정도가 훨씬 작아야 목표한 성능이 나오는데, 웹 우주망원경이 주로 관측하는 근적외선의 파장은 $2\mu\text{m}$ (마이크로미터)이므로 망원경 거울 표면은 이 굴곡의 정도 (이를 파형오차^{Wavefront Error}라고 한다)가 파장의 약 1/14에 해당하는 약 140nm (나노미터)보다 작아야 한다는 계산이 나온다. 웹 우주망원경의 각 조각 거울은 이미 엄격하게 이 기준에 맞춰 제작되었다. 그런데, 문제는 18개로 나누어진 조각 거울을 마치 하나의 거대한 6.5m 짜리 거울인 것처럼 조각과 조각 사이의 높낮이 차이가 140nm보다 작도록 정확하게 조절해야 한다는 것이고, 이것이 바로 거울 정렬의 최종 목표이다. 각 조각 거울의 뒷면 ([그림1] 참조)에는 쇠막대와 함께 7개의 액추에이터^{actuator} (구동기) 설치되어 있어 전진, 후진 및 상하좌우의 3차원 움직임과 오므리거나 펴는 동작 즉, 곡면을 조절할 수 있고, 이를 통해 10 나노미터 단위 (대략 머리카락 두께의 1만분의 1에 해당하는 크기)의 정밀도로 거울을 미세하게 조절할 수 있다.



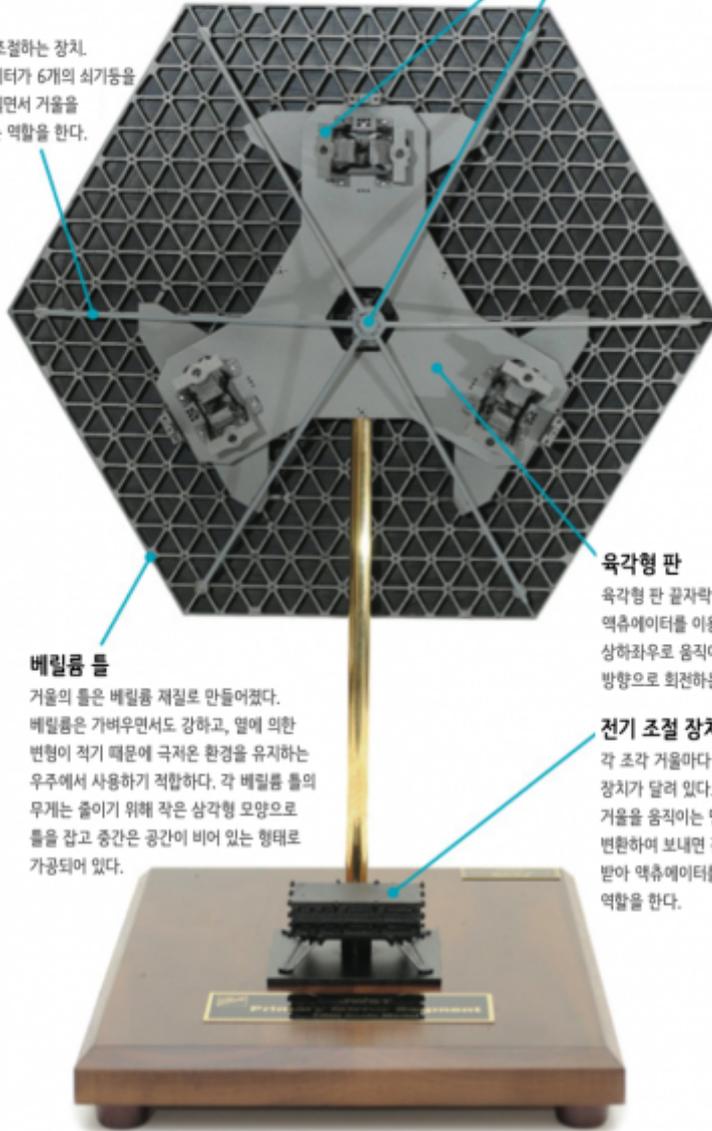
제임스웹 우주망원경의 조각 거울

액츄에이터 (구동기)

모터를 이용해 조각 거울을 미세하게 움직이는 장치. 각 조각 거울은 뒷면에는 7개의 액츄에이터가 달려 있다.

쇠기둥

거울의 곡률을 조절하는 장치. 중앙의 액츄에이터가 6개의 쇠기둥을 잡아당기거나 밀면서 거울을 오므리거나 파는 역할을 한다.



육각형 판

육각형 판 끝자락에 달린 6개의 액츄에이터를 이용해 조각 거울을 상하좌우로 움직이거나 시계 및 반시계 방향으로 회전하는 동작 등이 가능하다.

베릴륨 틀

거울의 틀은 베릴륨 재질로 만들어졌다. 베릴륨은 가벼우면서도 강하고, 열에 의한 변형이 적기 때문에 극저온 환경을 유지하는 우주에서 사용하기 적합하다. 각 베릴륨 틀의 무게는 줄이기 위해 작은 삼각형 모양으로 틀을 잡고 중간의 공간이 비어 있는 형태로 가공되어 있다.

전기 조절 장치

각 조각 거울마다 하나 씩 전기 조절 장치가 달려 있다. 망원경의 컴퓨터에서 거울을 움직이는 명령을 전기 신호로 변환하여 보내면 전기 조절 장치는 이를 받아 액츄에이터를 미세하게 조절하는 역할을 한다.

[그림1] 제임스웹 우주망원경의 조각 거울 뒷면.

각 조각 거울에는 7개의 액츄에이터와 6개의 쇠기둥이 달려 있어 여러가지 미세 조절이 가능하다.

Ball Aerospace

조각 거울을 조절하는 일은 쌍방향 통신에 의해 이뤄진다. 먼저 거울을 어떤 식으로 움직일 것인지 지상에서 컴퓨터가 계산을 끝내고 나면 기나긴 순차적인 명령이 포함된 파일을 망원경에 전송(업로드) 한다. 망원경 내의 컴퓨터는 이걸 받아서 전기 신호로 변환하여 각 조각 거울의 전기 조절 장치로 보낸다. 각 움직임이 끝나고 나면 거울마다 달린 센서의 정보 telemetry를 담은 파일이 다시 지구로 전송(다운로드) 된다. 광학팀은 이 정보를 토대로 거울의 움직임이 명령대로 정확하게 진행됐는지 확인하고, 이렇게 한 과정이 끝난다. 짧게는 수십 분, 길게는 몇 시간에 걸쳐 거울을 움직이는 작업이 수없이 반복된다.

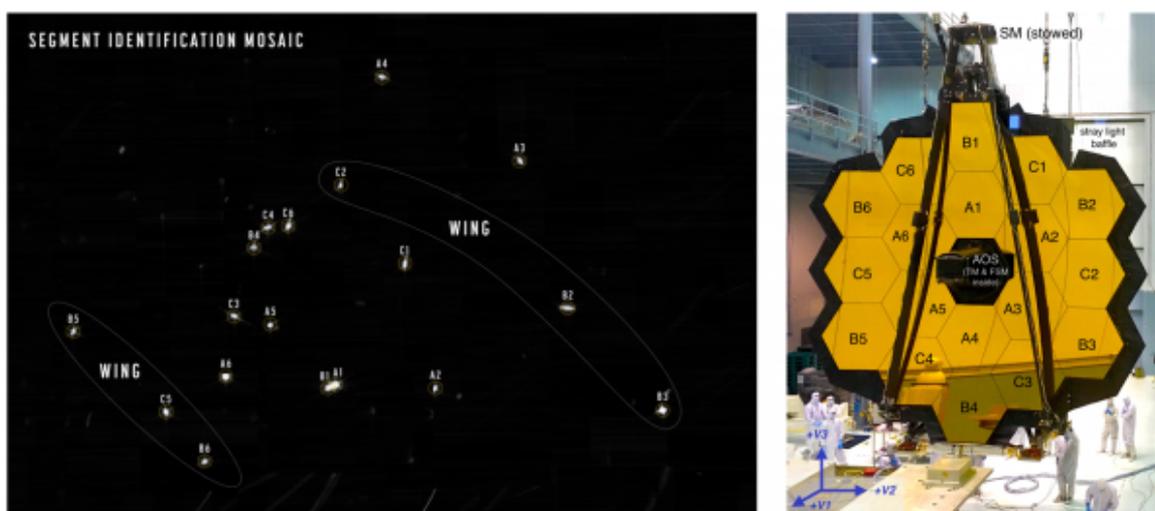
웹 우주망원경은 발사 당시의 심한 진동으로부터 보호하는 차원에서 18개의 각 조각 거울들을 뒷면의 틀에 밀착된 상태로 고정해놓았다. 발사 후 약 보름이 지난 시점에 L2점으로 날아가는 동안 망원경의 주경이 펼쳐졌고 바로 이어서 각 조각 거울을 틀에서 분리하여 앞으로 전진시키는 작업이 진행됐다. 이후의 거울 정렬 과정에서 거울을 자유롭게 움직이기 위해 각 조각을 총 1.25cm 정도 전진시켰는데, 18개의 조각을 모두 준비하는 데만 열흘이 걸렸다. 이렇게 거울을 천천히 전진시키는 이유는, 먼저 안전을 위해 거울을 전진시키는 구동기는 한번에 하나씩만 움직이게 설계되어 있다는 것이고, 또 거울 표면의 온도를 극저온으로 유지해야 해서 모터에서 나오는 미세한 열조차도 최소화 하기 위해 구동기 작동을 수 초 이내로 제한해서 그렇다. 18개의 조각 거울을 겨우 1.25cm 움직이는 데 열흘 정도가 걸렸으니 대충 계산해 보면 잔디가 땅에서 자라나는 속도와 비슷하다고 할 수 있다.

거울 정렬의 과정

웹 우주망원경이 L2에 도착한 직후인 2월 1일부터 거울 정렬 작업이 시작됐다. 거울 정렬의 전체 과정을 몇 개의 핵심 단계로 나누어 어떤 일이 진행됐는지 살펴보자.

1. 조각 영상 식별 Segment Image Identification

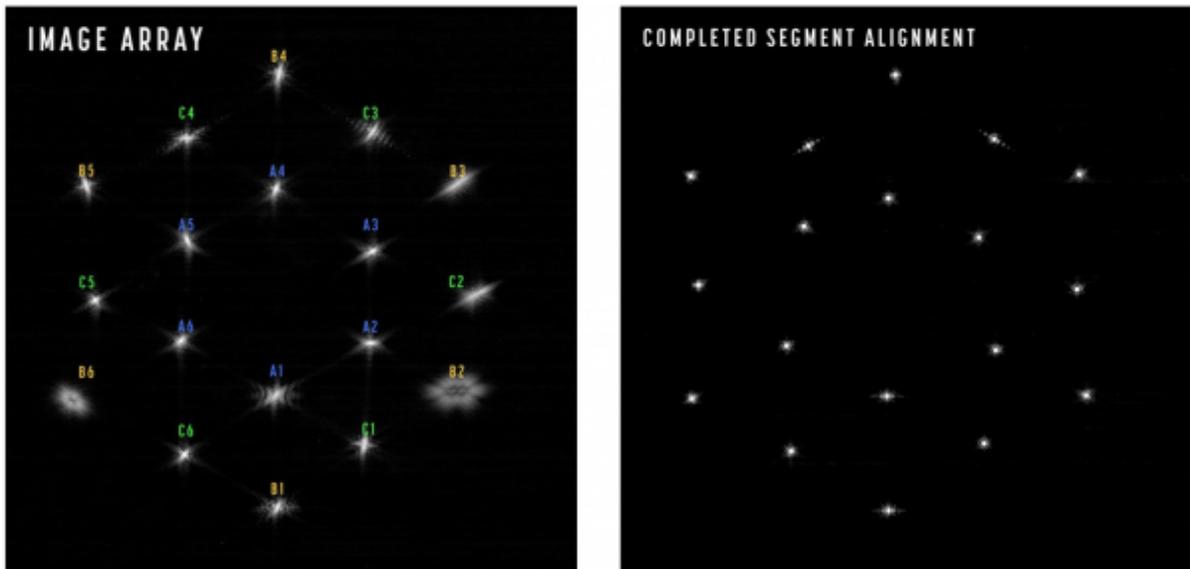
L2에 도착한 이후 아무런 정렬 과정을 거치지 않은 상태에서 각 조각 거울은 제각각 다른 곳을 바라보고 있다. 그래서 별 한 개의 영상을 촬영하면 18개의 점이 카메라에 찍힌다 ([그림2] 참조). 거울의 상태가 정확하게 어떤 지 모르는 상태라 어떤 점이 어떤 조각 거울에 해당하는지도 알 수가 없다. 그렇기 때문에, 가장 선행되어야 하는 일은 각 점을 식별하는 것이다. 방법은 간단하다. 각 조각 거울을 한 개씩 움직이면서 영상을 촬영한 후 어떤 점이 움직였는지를 보면 된다. 이렇게 하여 식별된 점들이 [그림2]에 나타나 있다.



[그림2](좌)조각 영상 식별 과정의 결과와 웹 우주망원경 조각 거울의 (우)식별 번호

2. 조각 정렬 Segment Alignment

이 단계가 되면 영상의 어떤 점들이 어떤 조각 거울에 해당하는지 알 수 있기 때문에 다음 단계인 영상 쌓기를 준비하기 위해 거울의 모양대로 위치를 정렬해 놓는다 ([그림3]). 이 과정에서 각 거울 조각의 초점을 대략적으로 찾아 전진 또는 후진시켜 놓는다. 원래 망원경 전체의 초점은 부경의 전진/후진으로 조절하게 되어 있지만, 웹 우주망원경의 경우 주경의 거울이 18개로 나누어져 있는 관계로 공통적인 초점을 주경으로 먼저 맞춘 후에 부경 조절을 하게 된다 ([그림 3-우]: 이 과정을 Global Alignment라고 부른다).

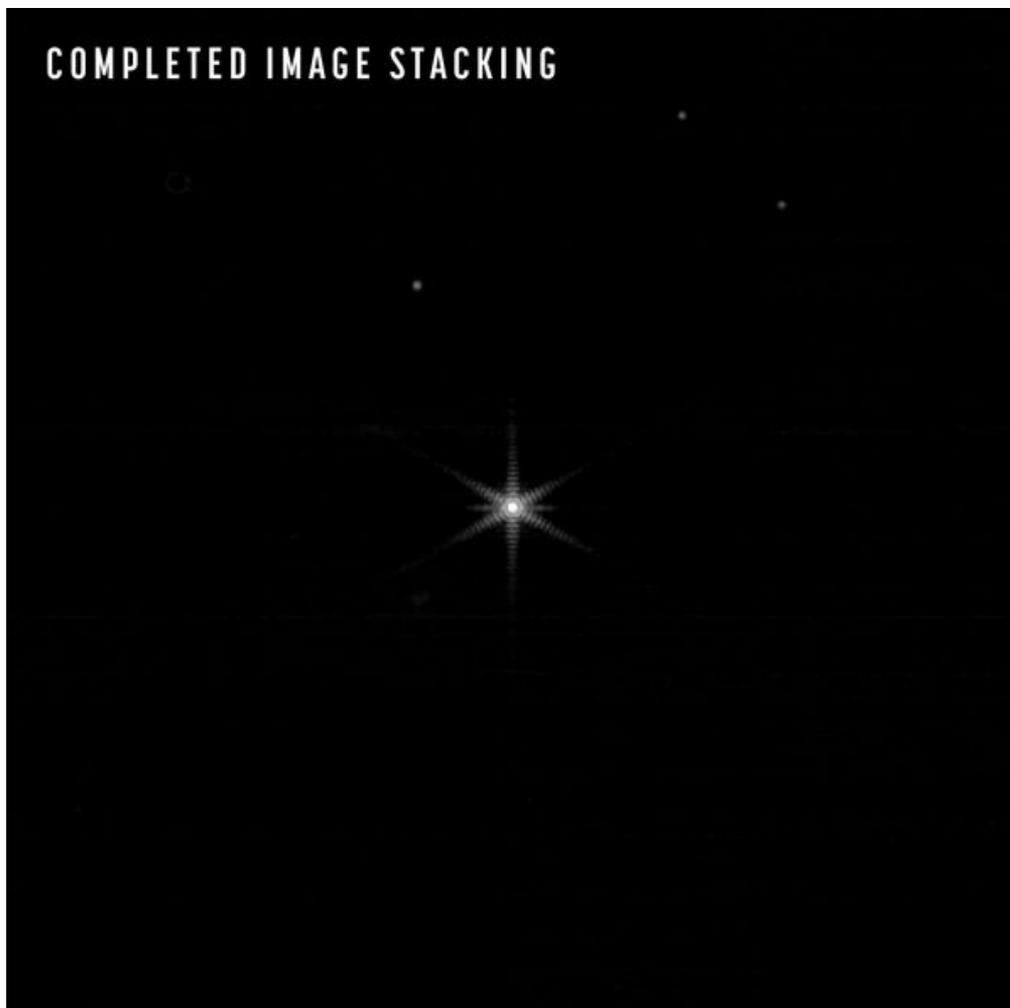


[그림3]조각 정렬 과정의 결과.

(좌)각 조각 거울의 초점을 맞추기 이전이고 (우)는 이후다.

3. 영상 쌓기 Image Stacking

조각 정렬이 끝나고 나면 이제 초점이 맞춰진 모든 점을 한 곳에 차곡차곡 쌓는 작업을 한다. 각 조각 거울을 미세하게 움직여서 하나의 별에서 나오는 빛이 한 점이 되게 만들면 영상 쌓기 과정은 완료된다 ([그림4] 참조).



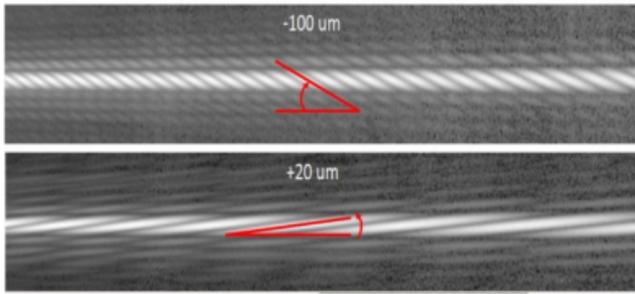
[그림4]영상 쌓기 과정의 결과. 비로소 한 별에서 나오는 빛이 한 점으로 모였다.

NASA

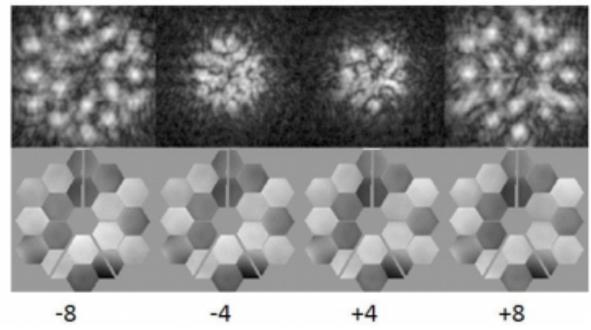
4. 간단 / 정밀 위상 조절 Coarse / Fine Phasing

이전 단계에서 별을 한 점으로 모으기는 했지만, 멧혀진 상을 볼 때 아직까지는 마치 18개의 망원경인 것과 같다고 할 수 있다. 각 조각 거울이 반사하는 빛의 위상^{phase}이 제각기 다르기 때문이다. 빛은 파장의 성질을 갖고 있어서 여러 거울에서 반사되는 빛을 정확히 하나로 모으려면 18개의 파형을 정확하게 맞추는 작업 즉, 위상 조절 또는 페이징^{phasing}을 진행한다. 페이징은 두 단계로 나뉘어서 하는데, 첫번째 간단 페이징 단계에서는 거울의 각 조각 거울의 높낮이를 조절하여 경계부분에서 차이가 없도록 하는 것이 목적이다. 이를 위해 빛의 간섭 현상을 이용하여 인접하는 두 조각 거울의 높이 차이가 얼마나 되는지를 측정하고 보정한다 ([그림5-좌]). 두 번째 정밀 페이징 단계에서는 빛의 파장보다 작은 단위로 남아 있는 위상 차이를 줄이게 되는데, 초점을 일부러 뺀 다음 특별한 렌즈를 이용해 거울의 각 조각에서 오는 빛을 따로 측정한다 (이를 'phase retrieval'이라고 한다). 이때, 모든 거울에 반사되는 파형이 완벽하게 일치하면 각 조각에서 측정된 빛의 세기가 같다는 원리를 이용하는데, 상대적으로 어둡게 측정된 조각들을 찾아 미세 조정하면서 파형을 정밀하게 맞춰준다. 페이징 과정이 끝나고 나면 웹 우주망원경이 만들어내는 영상은 하나의 큰 6.5m 짜리 거울이 만들어내는 영상과 차이가 없게 된다.

Coarse Phasing (간단 페이징)



Fine Phasing (정밀 페이징)



[그림5]페이징(위상 조절) 과정.

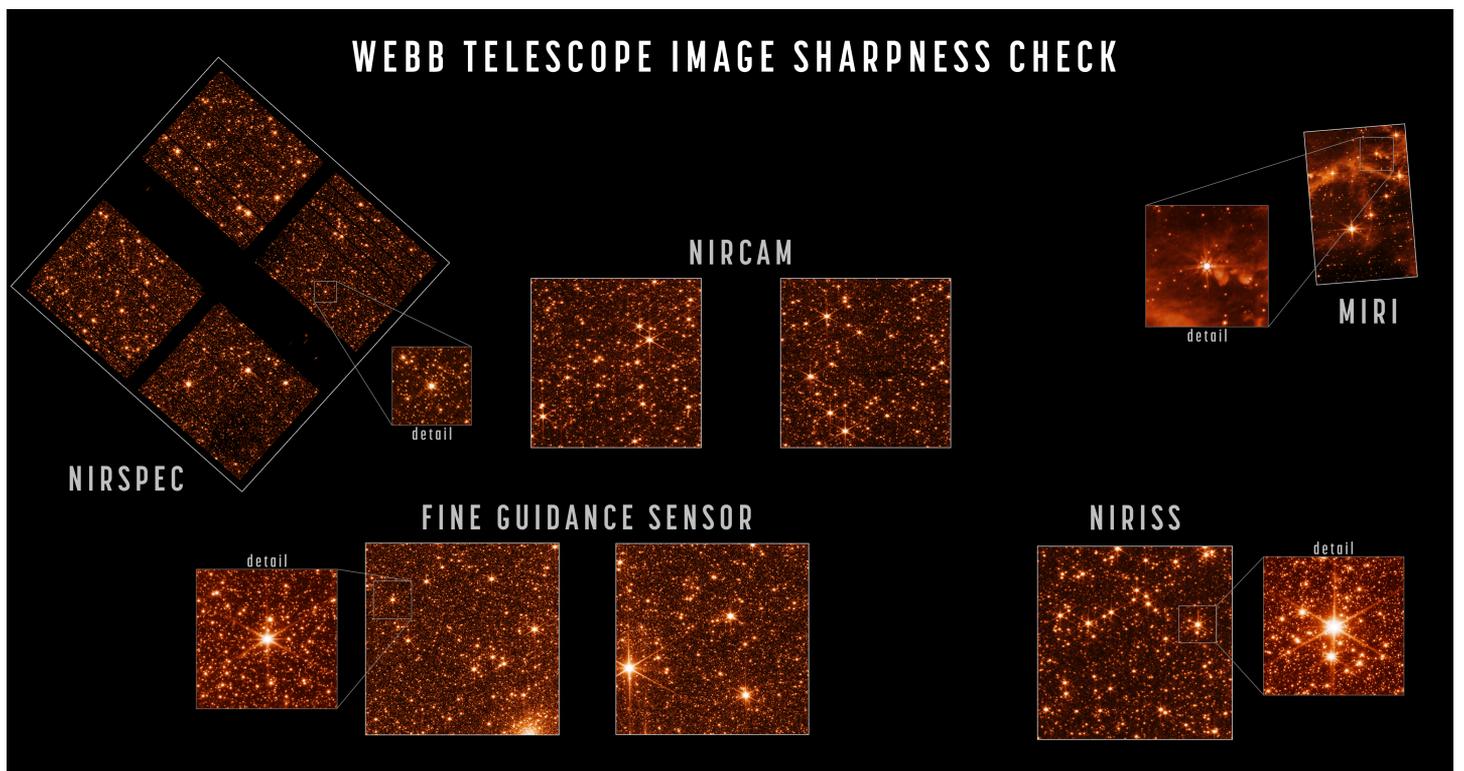
(좌)는 간단 페이징 과정을 보여주는데, 인접하는 두 조각 거울의 높이 차이가 $-100\mu\text{m}$ (좌-위)와 $+20\mu\text{m}$ (좌-아래)일 경우 두 거울을 통과하는 빛의 간섭 무늬가 어떤 모양인지 예를 보여준다.

(우)는 정밀 페이징 과정인데, $0.2\mu\text{m}$ 파장의 배수에 맞는 렌즈를 이용해 한 별을 4번 관측한 모습을 보여준다. 파형이 정확하게 일치하면 모든 영상에서 빛이 고르게 분포된다.

NASA

5. 전체 초점면에서의 거울 정렬

위 빛의 파형을 맞추기 위한 작업은 먼저 망원경 초점면의 한 지점에서 이뤄진다. 그러나 웹 우주망원경의 초점면은 상당히 큰 편인 데다가 각 과학기기가 위치한 곳의 거리가 꽤 멀기 때문에 한 점에서 초점과 파형이 모두 맞았다고 해서 다른 곳에서도 그럴 것이라는 보장이 없다. 초점면 전체에서 고르게 별의 상이 제대로 맺히려면 추가로 과학기들 전체에서 관측된 영상을 분석하는 작업이 필요하다. 만약 한 쪽의 초점이 잘 맞는데 다른 쪽의 초점이 잘 안 맞는 경우에는 부경을 수평 방향으로 조금 움직이거나 기울기를 조금 바꿔주어 보정하게 된다.



[그림6] 웹 우주망원경의 이미지 품질을 검토하기 위한 관측의 결과물.

사진에 보이는 거의 모든 별은 대마젤란 은하라는 작은 은하에 속한 별들로, 우리로부터의 거리는 약 16만 광년 정도 된다. 우측 상단 사진에는 중적외선 기기MIRI가 온도가 낮은 물질을 검출하는 특성 때문에 우주 먼지가 성운처럼 분포된 것이 보인다.

NASA, STScI

위의 다섯 단계는 한 번에 끝나지 않고 2번 또는 3번 반복하게끔 디자인이 되어 있다. 거울 정렬 과정에서 나타나는 작은 오차들 때문에 각 단계를 반복하고, 또 전체를 반복하는 과정이 있다. 이렇게 광학팀은 3개월 동안 교대 근무를 하며 바쁘게 보냈고 4월 28일 공식적으로 거울 정렬이 완료되었다고 선언했다. 같은 날 사진도 공개되었는데 ([그림6]) 모든 기기에 걸쳐 별의 상이 또렷하게 제대로 잘 맺히는지 확인하기 위한 관측의 결과물이다. 웹 우주망원경의 초점면 전체에 많은 별을 담기 위한 목적에 맞게 대마젤란 은하Large Magellanic Cloud의 한 영역을 선택하여 촬영했다.

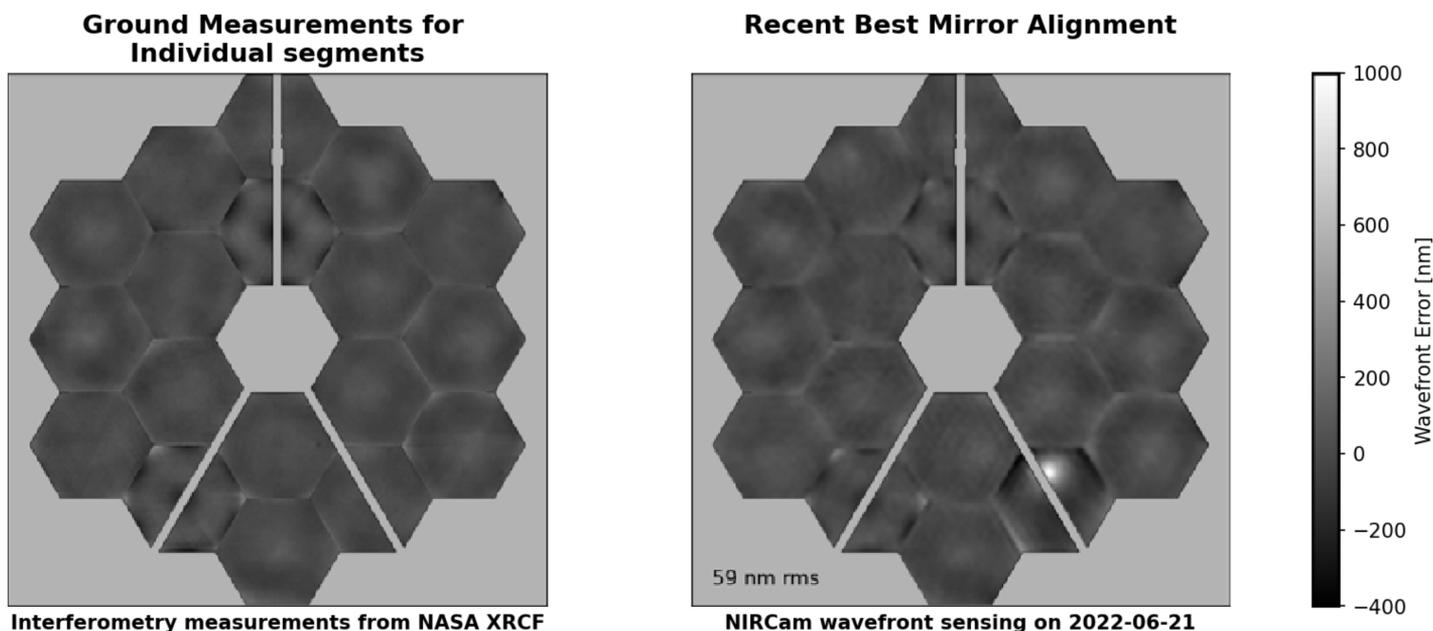
거울 정렬의 결과

3개월 동안 진행된 거울 정렬은 대성공이었다. 초반 단계부터 별 영상들의 품질을 보고 내부적으로 내린 결론은 당초 예상했던 성능의 최고치를 웃도는 망원경이 되지 않을까 하는 것이었다. 아니나 다를까, 모든 과정을 마치고 거울 정렬의 정도를 수치로 계산하여 결과를 내부에서 발표했을 때 광학팀 내에서 탄성이 나올 정도로 좋은 결과가 나왔다. 웹 우주망원경은 거울의 회절한계diffraction limit가 $2\mu\text{m}$ 파장에서 이뤄지게끔 하는 것이 목표였다. 즉, 거울이 $2\mu\text{m}$ 또는 그보다 긴 파장의 빛을 반사해 상을 맺을 경우 별 영상의 품질이 이론적인 한계에 다다르고, $2\mu\text{m}$ 보다 짧은 파장의 빛은 거울 표면의 불완전함(조각 거울마다 어긋나서 들쭉날쭉한 정도)에 따라 영향을 받는다는 것이다. 빛의 파장이 짧으면 짧아질수록 표면의 고르기 정도가 점점 더 완벽에 가까워져야 한다. 최종적으로 계산한 결과 현재 웹 우주망원경 서울의 회절한계는 무려 $1.1\mu\text{m}$ 파장에서 이뤄지는 것으로 나와 목표를 훨씬 뛰어넘었음이 확인됐다. 이에 힘입어서 전체적인 영상의 품질도 예상보다 좋다는 결론이 나왔는데, 천체를 촬영할 때 카메라에 기록되는 신호의 세기가 10-20% 정도 효율이 높게 나왔다.

거울 정렬 과정 중 뜻 밖의 위기

거울 정렬을 한 번 완료한다고 해서 거울이 같은 상태를 계속 유지하는 것은 아니다. 망원경이 작동하는 동안 미세한 진동이 있고, 아주 적은 열에 의한 변형도 발생하며, 또 작은 입자가 날아와서 부딪힐 확률도 있기 때문에 정렬된 조각 거울이 틀어지는 일이 비교적 자주 발생한다. 그 중에서 미세운석micrometeoroid의 충돌은 허블 우주망원경과는 달리 경통이 없는 망원경 구조 상 필연적으로 발생할 수 밖에 없는 일이다. 이 때문에 NASA가 이미 발사 이전에 여러가지

자료를 바탕으로 제2라그랑주점에서 웹망원경의 거울에 얼마나 충돌이 있었지에 대한 예측이 이미 나와 있다. 웹우주 망원경의 커미셔닝이 진행되는 6개월 동안 수 차례의 충돌이 일어났는데, 그 중 대부분은 예측한 대로 거울의 성능에는 영향을 주지 않는 정도의 충격이었다. 그러나 지난 2022년 5월 23-25일 사이에 (거울을 실시간으로 모니터링하는 것이 아니라서 정확한 날짜와 시간을 특정할 수 없다) 있었던 미세운석의 충돌은 이야기가 조금 달랐다. 바깥 쪽의 조각거울 중 하나인 C3 조각거울이 모래 알갱이 크기의 입자에 정면으로 맞아 꽤 깊은 상처가 났고, 찌그러진 부위나 깊이를 볼 때 거울 뒤의 액츄에이터로는 회복하기가 어려울 것이라는 진단이 나왔다 ([그림7] 참조). 광학팀은 일단 최대한 가능한 범위 내에서 거울의 곡률을 조정해 주었고, 다행히도 C3조각의 찌그러진 정도가 우려했던 것에 비해 거울 전체의 성능에는 영향을 별로 주지 않는다는 결론이 나왔다. 5월 중에 있었던 미세운석 충돌을 계기로 웹우주망원경 팀은 충돌에 의한 거울의 손상을 방지하는 대책을 마련 중이다. 보통 태양계 내 혜성이 지나간 궤적을 따라 많은 입자 먼지들이 혜성과 비슷한 궤도를 따라 태양 주위를 돌게 되는데 (지구가 이를 지나가게 되면 유성우가 관측된다) 이에 대한 기존에 알려진 예측 모델을 수정하는 작업을 진행 중이다. 또한, 미세운석이 거울에 “정면 충돌”하는 확률을 줄이기 위해 웹우주망원경의 거울을 궤도방향으로 향하지 않도록 관측 대상을 제한하는 방법도 고려하고 있다. 만약 미세운석의 충돌로 인해 18개의 조각거울 중 하나가 도저히 망원경 거울로서의 역할을 하지 못할 정도로 심하게 손상됐을 경우 해당 조각거울의 초점을 완전히 빼서 상이 맺히지 않게 하는 방법, 즉 17개의 거울로만 망원경을 운영하는 비상 대책도 마련되어 있다. 물론 실제로 그런 일이 일어나지 않기만을 바랄 뿐이다.



[그림7] 거울의 정렬 상태를 알려주는 파형오차(Wavefront Error) 맵.

전체 음영의 고르기가 고를수록 정렬이 잘 되고 망원경의 성능이 좋다는 이야기다.

(좌) 지상에서 측정한 경우인데, 지난 4월 말 거울 정렬이 막 완료된 후의 맵이 이와 거의 유사하다.

(우) 2022년 6월 21일 측정한 경우인데 다른 조각 거울들에는 큰 변화가 없지만 우측 아래의 C3 거울은 5월 23-25일 사이에 있었던 미세운석 충돌에 의한 손상을 극명하게 보여준다.

거울 정렬 그 이후

광학팀은 초반에는 이틀에 한 번씩, 7월 이후로는 1-2주에 한 번씩 위에서 설명한 정밀 페이지징 과정을 거쳐서 정렬이 얼마나 틀어졌는지 측정하고 보정하는 작업을 계속 반복하는 중이다. 일종의 '관리 모드'로 돌입하게 된 것이다. 미세운석에 의한 충돌을 제외하고는 거울이 틀어지는 정도가 미미하기 때문에 보정은 매번 측정 때마다 이뤄지지 않고 필요에 의해서만 진행한다. 거울 정렬이 완료된 후 5월 초부터 또 약 2개월에 걸쳐 과학기기 캘리브레이션 작업을 마쳤다. 필자는 광학팀뿐만 아니라 근적외선 이미지분광기^{Near Infrared Imager & Slitless Spectrograph (NIRISS)} 팀에도 속해 있고, 광학팀 내에서의 일들이 모든 기기팀들의 준비 작업과 깊이 관련되어 있어서 5-6개월을 쉴 새 없이 달렸다. 이 기간에는 주말도 휴일도 없이 하루가 멀다고 웹 우주망원경 팀원들과 회의를 진행하며 기기를 최상의 상태로 준비해 놓기 위해 열을 올렸다. 2022년 7월 초 웹 우주망원경의 모든 준비과정이 완료되었다고 선언했을 때 모든 팀원은 서로 축하하며 기쁨의 환호성을 질렀다. 개인적으로 이야기를 나눴던 팀원들은 저마다 인생에서 가장 보람차고 자랑스러웠던 기간이었다고 공통으로 이야기한다. 준비가 완료된 웹 우주망원경은 이제 우주의 비밀을 푸는 열쇠로 쓰일 일만 남았다.

연재를 마치며

제임스웹 우주망원경이 보여줄 우주의 모습은 어떤 것일까? 당시에 외부에 공개하지는 못하였지만, 거울 정렬 과정 중 필자가 속한 광학팀 내에서 얻은 테스트 이미지들 몇 개만 봐도 (당연하지만) 허블 우주망원경이 촬영한 수준을 훨씬 뛰어넘는 걸 확인할 수 있었다. 그리고 지난 7월 11~12일에 공개된 웹 우주망원경의 첫 컬러 사진들은 전 세계에서 폭발적인 관심을 끌기에 충분했다. 직경이 6.5m 나 되는 거대한 거울이 우리에게 선사할 자료를 통해 우주에 대한 인류의 지식은 얼마나 깊어질까? 허블 우주망원경은 22일 동안의 '허블 딥 필드' 관측으로 우주의 비어 보이는 공간에도 은하가 가득 차 있다는 사실로 세상을 놀라게 했다. 제임스웹 우주망원경은 한발 더 나아가서 최초의 별들을 관측할 것인데, 우주 최초의 모습은 과연 어떤 것일까? 또, 웹 우주망원경을 통해 태양계 바깥 행성들의 대기 성분을 분석하여 지구와 비슷한 환경을 지닌 행성들이 있다는 사실을 증명할 것이다. 만약 외계 생명체가 존재한다는 걸 알게 되면 우리는 어떤 반응을 보일까? 이런 걸 상상하는 것만으로도 흥분되지만 앞으로 우리 눈앞에 현실로 다가올 것이라는 생각이 더욱 가슴 벅차게 한다.