

분할경의 광학기술

관측천문학의 역사는 망원경 발달의 역사이기도 한데 향후 망원경 개발에 있어서 분할경 제어 기술은 필수 기술이다. 본고에서는 미국에서 진행해 온 제어기술과 신기술망원경에서 개발을 진행하고 있는 독자적인 제어방식에 대해서 소개한다. 이 원고는 교토대학대학원 이학연구과의 이와무로 후미히데씨가 월간 'O plus E' 2009년 4월호에 기고한 내용으로서 그린광학의 유정훈 팀장이 번역에 도움을 주었다.

〈편집자 주〉

1. 거대화하는 망원경

관측천문학의 역사는 망원경 발달의 역사이기도 하다(그림1). 20세기 초, 로스앤젤레스 교외에 있는 Wilson산 천문대에 근대망원경의 시초가 되는 구경 1.5m반사망원경이 건설되었다. 그 이후, 관측천문학은 기계기술·반도체검출기·컴퓨터 발전에 동반해 급속히 진전하고, 각각 시대에 대한 최고기술을 결집한 망원경과 관측장치를 사용해서 새

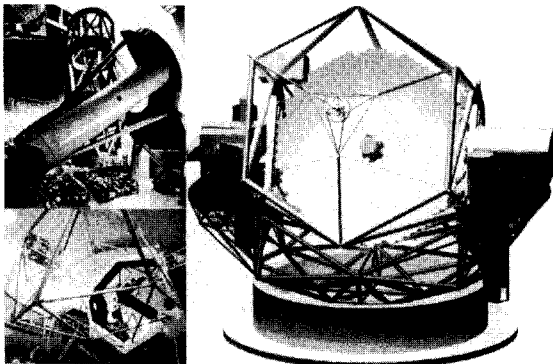


그림1. 근대망원경의 변천. 좌상에서 Wilson산 1.5m, Hale 5m, Keck 10m, 차세대 30m망원경. 크기 차이를 알 수 있도록 척도는 맞추고 있다.

로운 Frontier가 열려왔다. 현재에서는 기계적인 크기 한계를 정밀한 측정·제어기술로 극복하고, 새로운 한계에 도전하는 계획이 시작하고 있다. 현재 관측천문학의 최전선에서 활약하고 있는 망원경 주경에는 (1)1m사이즈의 육각형 미러를 조합한 분할경, (2)내부가 벌집구조이고 경량 강고한 하니콤 미러, (3)얇은 경을 고정도의 기술력제어로 최고정도 형상으로 하는 메니스커스 미러의 3가지 종류가 있다. 이 중에서 분할경은 가장 큰 구경을 얻을 수 있고, 현재 4대 가동하고 있는 구경 10m이상의 망원경은 모두 분할경을 사용한 망원경이다

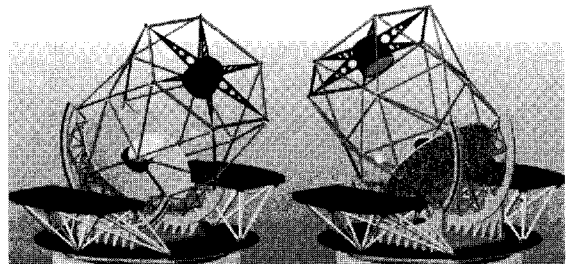


그림2. 京大신기술 망원경. 구경3.8m의 중구경 망원경에서 일본 독자적인 기술로 만든 차세대 초대형 망원경의 Prototype으로서 오카야마에 건설예정

(8.4m경 2매를 사용한 망원경도 있지만, 단일구경으로서는 10m이하이기 때문에 여기에는 포함하지 않는다). 그리고 차세대 초대형 망원경 계획도 분할경망원경을 중심으로 진행되고 있고, 이후의 망원경 개발에 있어서도 분할경 제어기술은 필수 기술이다. 그러나 일본에서는 분할제어 경험이 없기 때문에 현시점에서는 독자적인 차세대 망원경 계획을 가지는 것은 매우 곤란하다. 또 차세대 초대형 망원경은 건설비도 막대하게 들고, 기술적으로도 곤란한 상황이다.

교토대학 우주물리학과교실에서는 이학연구과부속 천문대, 국립천문대 오카야마(岡山)천문물리관측소, 나고야대학 광적외선천문학연구실, (주)나노오프트니쿠스 연구소와 공동으로 일본 최초의 분할경 방식인 신기술 망원경(그림2)을 오카야마에 건설하고, 일본 독자적인 분할경 제어기술과 주경 제작기술을 개발하는 계획을 진행하고 있다. 주요 개발항목은 다음의 3가지이다.

- 저가이고 심플한 분할경 제어기구의 개발
- 초정밀 대형 연삭가공기에 의한 분할경의 고속제작
- 경량 튼튼한 최적화한 트러스가대 제작

여기에서는 분할경 제어의 이야기로 넘어가 지금까지 미국에서 진행해 온 제어기술과 상기의 신기술 망원경에서 개발을 진행하고 있는 독자적인 제어방식에 대해서 소개하겠다.

2. 분할경 제어

분할된 경을 조합해서 하나의 상을 결상시키는 것에는 3가지 단계가 있다. 우선 행하는 것이 포커싱(focusing)이다. 이것은 각 분할경에 의한 별 image가 제각각으로 나누어져 있는 상태에서 개개의 미러를 상하방향으로 움직여 포커싱해서 별 image사이지를 최소로 해두는 것이다. 다음에 행하는 것이 포커싱이다. 개개 분할경의 각도를 조정해서 별 image를 하나로 겹치는 것으로 미러 방향을 정돈하는 작업이다. 이 단계에서 개개 분할경의 초점과 방향을 조정할 수 있지만, 이 상태는 아직 완전한 상태는 아니고, 소구경의 망원경 해상도인채 광량만이



그림3. 京大신기술 망원경의 18매 분할경에 대한 위상맞춤의 효과. 분할경 포커싱과 위치맞춤만을 마친 상태(좌도)에서 위상을 맞춘 상태(우도)까지의 단일파장에서의 회절한계 image 변화. 실제로는 파장 차이에 의한 다양한 패턴의 겹침 때문에 smooth하게 확장된다. 또 미러의 분할수가 증가할수록 차이는 크게 된다.

증가한 상태이다. 분할경을 전체에서 1매의 미러로서 기능시키기 위해서는 이 상태에서 더욱더 위상맞춤을 행할 필요가 있다. 이 작업은 인접끼리의 미러 경면위치를 파장의 8분의 1이상 정도로 맞추는 작업이고, 이 수십nm 정도에서의 미조정을 거쳐 처음으로 1매 미러와 동등한 성능이 발휘된다(그림3). 통상 관측경우는 별 image사이지는 대기요동의 크기(seeing)로 정하기 때문에 위상까지 맞춤 필요는 없지만, 대기요동을 보정하는 보상광학을 사용할 때에는 망원경 한계성능에서의 관측으로 되어 위상맞춤이 필수적이다.

분할경 제어는 통상적으로 비접촉센서에 의한 분할경 사이의 10nm정도에서의 상대위치 측정과 스트로크(stroke) 1mm전후의 고정도 액추에이터 조합에 의해 행해진다. 액추에이터는 미러 수의 3배, 센서는 그것 이상의 수가 필요로 하기 때문에 거대망원경 건설 때에는 정도가 좋아도 매우 고가인 것은 사용할 수 없다. 이와 같은 조건하에서의 액추에이터로서는 볼나사 등을 포함하는 리니아 액추에이터를 지레와 유압실린더를 거쳐 증폭한 것과, 센서로서는 대향(對向) 금속판과의 정전용량에서 거리를 측정하는 정전용량 센서와 대향코일과의 상호 인덕턴스(inductance)를 측정하는 인덕턴스 센서가 이용되고 있다. 그 외 1측정 점당에서의 코스트 면에서 약간 뒤지지만, 다수의 광파이버 프로브를 갖춘 레이저 간섭 변위계도 이용할 수 있는 가능성은 있다. 이것들의 조합에 의해 기온 변화와 망원경의 자세변화에 동반하는 분할경의 상대위치 흔들림을 측정해서 최적위치가 되도록 항상 조정이 행해진다. 그러나 정전용량과 인덕턴스를 측정하는 센서는 기온과 습도 등의 환경변화에 의해

수일에서 수주 간에서 반드시 원점위치로 차이가 생기고, 분할경 상대위치가 흔들리기 때문에 최적인 분할경 위치를 광학적으로 측정해서 센서 원점을 재결정할 필요가 있다. 이것이 위상측정카메라의 역할이다.

3. 위상측정카메라

망원경의 주경전체에 이상적인 평면파가 입사하는 경우, 그림3에 상당하는 위상맞춤의 과정은 디포커스 image를 사용해서 더욱더 상세히 확인하는 것이 가능하다. 분할경 간의 광 위상이 불연속인 경우에는 인접끼리의 미러 끝에서의 회절광 간섭에 의해 미러의 경계부분의 광이 약해, 디포커스 image는 불연속으로 된다. 미러 면 위치가 완전히 일치한 상태에서는 디포커스 image는 어느 파장에서든 위상차 없이 smooth하게 연결하기 때문에 위상이 일치한 것을 확인할 수 있다(그림4).

실제 천체에서의 광은 주로 지구대기 상층부의 빠른 기류와 지표부근에서의 난류에 의해 흔들리기 때문에 망원경의 구경전면에 걸쳐 이상적인 평면파가 입사하는 것은 없고, 스바루 망원경과 keck망원경이 있는 하와이섬 마우나케아 정상에도 파면 흔들림 사이즈는 가시광에서 20cm정도의 사이즈로 되어 있다(일본국내에서는 7cm). 그러나 파장 3 μ m의 적외선에서의 파면 요동 사이즈는 2m정도로까지 확산되고, 단일 분할경에 대해서는 평면파로 볼 수 있도록 되기 때문에 keck망원경에서는 적외선카메라를 사용해서 그림4 효과를 확인하고 있다.¹⁾ 가시광에서 분할경 위상을 확인하기 위해서는 평면파로

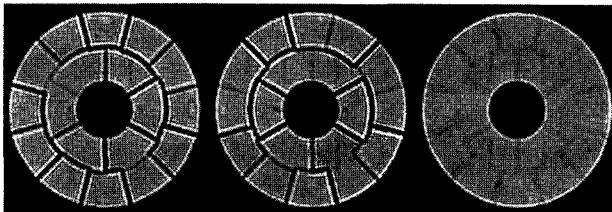


그림4. 디포커스 image에 대한 위상맞춤 효과. 그림3과 대응하는 순으로 배열했다. 京大신기술 망원경은 세계 최초의 날개형 미러를 사용한 분할경망원경이고, 깨끗한 회절한계 image가 얻어지는 것 외에 대형화해서 분할경 매수가 증가해도 육각형 미러에 비해 미러 종류가 적게 끝나는 장점이 있다.

볼 수 있는 사이즈에까지 구경을 모을 필요가 있다. 즉, 그림4에서 분할경의 경계부근 광만을 좁힌 범위에서 내고, 간섭에 의한 콘트라스트를 높이기 위해 집광해서 회절한계 image를 검사한다. 이 경우 광속 내에서 경계를 끼운 2개 부분의 위상이 차이나 있으면 회절상은 간섭 때문에 분열하고 2개의 core를 가지는 상태로 된다. 이 효과를 이용해서 분할경간의 위상 차이를 측정하는 것이 위상측정카메라이다.

그림5는 단일파장의 경우에 대해서 회절한계상의 변화 모습을 나타낸 것인데, 위상이 1파장 분씩 차이나는 것에 같은 image형상이 반복해서 출현한다. 그러나 실제에는 파장이 다르면 경면위치 차이에 의해 생기는 위상차이의 양도 변화하기 때문에 다양한 파장성분의 겹침에 의해 그림5의 특징은 파장대가 넓게 될수록 균일화되어 차이를 알기 어렵게 되어 간다. 완전히 경면위치가 일치한 경우에는 파장대폭에 상관없이 그림5 중앙에 상당하는 회절한계상이 얻어진다. 그 때문에 우선 파장 폭이 좁은 필터를 사용해서 샤프한 회절한계상이 얻어지는 장소를 찾고, 서서히 필터 파장 폭을 넓혀 조정범위를 모아간다. 이 방법에서 keck망원경에서는 30nm의 경면위치 정도를 달성하고 있다.²⁾ 그러나 이 방법에서는 협대역에서 광대역 필터까지 수 종류의 필터를 교환하고, 4등성에서 7등성까지 각 필터에서 최적인 밝기로 되는 천체와 망원경 방향을 바꾸면서 관측·조정을 반복할 필요가 있기 때문에 날씨와 seeing이 좋은 날에서도 미조정이라

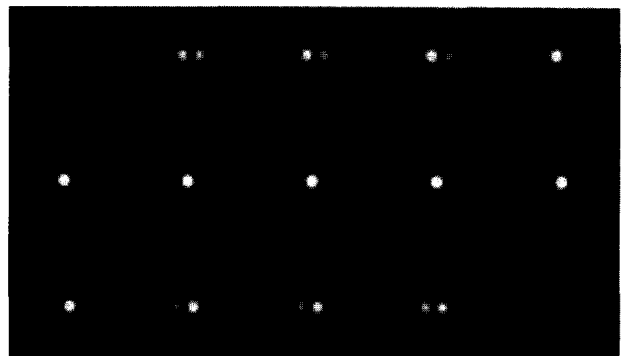


그림5. 2분할된 광속에 의한 간섭효과에서 회절한계 image가 분열하는 모습. 상단 좌부터 -6/13파장, -5/13파장 순으로 1/13파장씩 위상이 변화하고, 하단 우에서 +6/13파장의 차이로 되어 있다. 위상측정카메라는 이 효과를 이용해서 분할경 간의 경면 차이를 측정한다.

면 1시간, 분할경 하나를 교환하는 것은 반나절정도의 시간을 요하는 조정 작업으로 된다.

4. 자기위상(自己位相) 측정기구

앞서 소개한 내용과 같이 분할경의 경면 위치 맞춤의 작업은 수고와 시간이 걸리는 작업인 한편, 관측 가능한 야간의 귀중한 시간을 필요로 한다. 그 때문에 이 위상맞춤 작업은 빈번히 행할 수 없다. 그러나 낮의 Dome내와 관측 틸의 수분의 시간에서 경면 위상의 상태를 확인할 수 있으면 분할경을 항상 최적의 상태로 유지할 수 있다. 京大신기술망원경에서는 종래의 별을 사용한 위상맞춤 외에 자기(自己)광원을 사용해서 분할경간의 위상차를 측정할 수 있는 방법을 시험할 예정이고, 현재 그 기초시험을 진행하고 있다.

초점면에서 레이저를 조사하면 통상과는 반대의 광로에서 공간을 향한 평행 광으로 되어 광은 나와 가지만, 그 일부분을 분할경 경계부에 배치된 소형의 하프미러(그림 6)에 복귀하는 것으로 별의 광을 사용한 측정과 동등한 측정을 할 수 있는 것으로 기대할 수 있다. 조사하는 레이저로서는 헬륨네온 레이저의 주요 가시발진 파장인 543nm, 604nm, 612nm, 633nm의 4종류 파장을 바꿀 수 있는 것을 사용하면 그림5의 간섭패턴이 4가지 단색 파장으로 얻어진다(그림7). 이 결과를 그림5에 있는 13분할 template과 비교해서 4가지 파장의 각각에 대해서

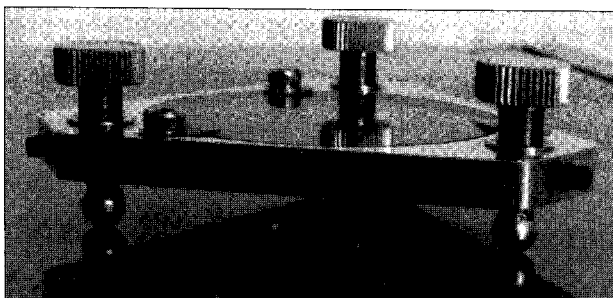


그림6. 분할경 경계상에 배치되는 하프미러(시작품). 주경통면상에 직경 2mm 정도의 금속편을 접착해 두고, 3분의 높이 조정나사 선단에 설치된 neodymium자석구에 의해 자력으로 고정한다. 이것에 의해 초점면에서 조사된 광의 일부가 다시 초점면으로 복귀한다.

패턴을 결정하는 것에 의해 목표위치에서 $\pm 10\mu\text{m}$ 의 범위 내에 있어서 $\pm 5\text{nm}$ 정도로 차이나는 별을 확정할 수 있다(주경에 2도 반사해서 복귀하기 때문에 광로차는 경면 위치 차이의 4배로 된다).

이 방법은 비교적 큰 차이 별이라도 단시간에서 고정도의 위치결정을 할 수 있기 때문에 관측 틸이 짧은 시간에서 조정할 수 있는 것이 특징이다. 결점으로서서는 경면상에 산란체가 두어지는 것으로 고스트와 미광이 발생할 가능성이 있다. 그러나 이상이 있는 경우에 하프미러 홀더는 간단히 떼어낼 수 있기 때문에 별로 문제될 것은 없다고 생각한다.

5. 京大신기술 망원경이 목표하는 것

京大신기술 망원경은 차세대 초대형망원경의 Prototype망원경으로서 건설되는 기술개발에 주안을 둔, 지

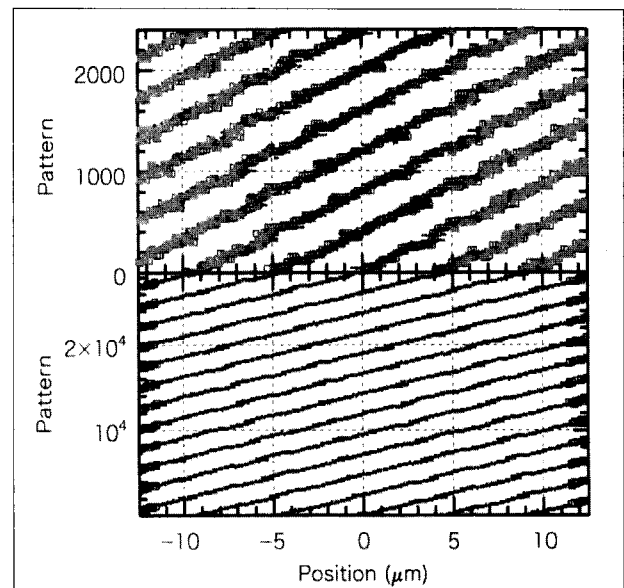


그림7. 경면이 완전히 일치해 있는 상태에서 전후로 수 μm 차이 났을 때의 4가지 파장에서의 회절 image의 패턴변화 모습. 하단은 1파장을 13단계로 판정한 경우(그림5참조)로 134=28,561 상태가 있고, 상단은 그 반분인 7단계로 판정한 경우에서 74=2,401의 상태가 있다. 점은 패턴에서 위치가 1점에 특정할 수 있는 곳, 백 제거 4각은 대응점이 2점 있는 곳, 중간 칠의 4각은 대응점이 3점 이상 있는 곳을 나타낸다. 7단계밖에 판정할 수 없는 경우에서도 차이가 $\pm 5\mu\text{m}$ 이내에 있으면 70%의 확률에서 1점을 특정할 수 있고, 남은 경우에서도 후보는 2점에 모이기 위해 조금 차이 나게 해서 다시 측정하는 것으로 위치를 1점으로 결정할 수 있다.

급까지 없는 타입의 망원경이다. 이 망원경에서는 제어와 경면제작 등 가는 곳마다 새로운 방법을 실천하고, 일본 독자의 기술개발이 진행되는 외에 일본 국내의 각 대학에 대한 장치개발의 거점으로서도 이용될 예정이다. 또, 아시아 유일의 중구경 범용망원경(중국에서도 중구경 망원경 개발이 진행되고 있지만, 분광탐사 전용의 것)으로서 돌발(突發)천체의 관측 등에서 중요한 역할을 담당하는 것으로 기대되고 있다.

관측천문학은 고에너지물리와 같은 식으로 Big Science로 되고 있고, 각 대학이 독자 계획에 있어서만 프로젝트를 가지는 것이 어렵게 되고 있다. 그러나 기술개발과 제조를 할 수 있는 인재육성은 대학이 담당할 중요한 역할

이고, 京大에 있어서도 신기술망원경 프로젝트를 통해서 기술개발도 할 수 있는 천문학자 혹은 천문학도 할 수 있는 기술자를 배출하고 싶다.

참고문헌

- 1) G. Chanan, M. Troy, and C. Ohara: "Phasing the Primary Mirror Segments of the Keck Telescopes: A Comparison of Different Techniques," (2000)
http://celt.ucolick.org/reports/report00_8.pdf
- 2) G. Chanan, M. Troy, F. G. Dekens, S. Michaels, J. Nelson, T. Mast, and D. Kirkman: "Phasing the mirror segments of the Keck Telescopes: the broadband phasing algorithm," Applied Optics, Vol. 37, pp. 140 ~ 155 (1998)

방송용 입체 카메라 렌즈, 복강경 입체 카메라, 입체 현미경, 미니 입체 프로젝터 출시

주)프로옵틱스, www.prooptics.co.kr, 031-635-9732, prooptics@prooptics.co.kr

<p>* 연혁</p> <ul style="list-style-type: none"> - 00년 : 프로옵틱스 설립 - 08년 : 주)프로옵틱스 법인 설립 - 10년 : 주)프로옵틱스 벤처기업 인증 - 10년 : 제 2사옥 준공 - 11년 : 주)프로옵틱스 기업부설연구소 인정 <p>* 사업분야</p> <ul style="list-style-type: none"> - 광학설계 제작 - 무편심 조립 기술을 이용한 초정밀 광축조정 - Line CCD용 AOI렌즈(고정초점, 줌렌즈) - Wafer 검사용 광학계 - PCB, LCD 노광렌즈 - 마스크리스 노광렌즈 - Anomorphc 노광렌즈 - 입체 카메라, 입체프로젝터, 입체현미경, 입체내시경 - 지문인식 렌즈 - 내방사선 감시렌즈 	<p>* 특허 등록 13건</p> <ul style="list-style-type: none"> - (10-0636505) Line CCD를 이용하는 검사용 광학계용 조명장치 - (10-0760214) 웨이퍼 검사용 광학계 - (10-0786677) 무손실 광로 결합장치를 이용한 입체영상 촬영용 스테레오줌렌즈계 - (10-0817881) 입체영상 촬영렌즈계 - 3-DIMENSIONAL PHOTOGRAPHIC LENS SYSTEM (중국) - (10-0919027) 무편심 렌즈부품의 제조방법 및 이에 의해 제조된 렌즈부품 - (10-0952158) 마스크 리스노광장치용 마이크로 프리즘 어레이 - (10-1038292) 광량 손실방지 기능을 갖는 복강경용 광학계 - (10-1041407) 입체 내시경 광학계 - (10-1038746) 확산광 차단기능을 갖는 노광장치용 마이크로 터널 어레이 - (10-1063362) 링렌즈의 조립방법 - (10-1064627) 확산광 차단기능을 갖는 노광장치용 마이크로프리즘 어레이 - (2011.09.29 등록결정) 입체 투사광학엔진 <p>* 특허 출원중 16건</p> <ul style="list-style-type: none"> - 마스크 리스노광장치용 마이크로 미러 어레이 : 2건 - 입체영상 투사 광엔진 : 3건 - 입체영상 촬영렌즈계 : 1건 - 3-DIMENSIONAL PHOTOGRAPHIC LENS SYSTEM (미국, 일본) - 유리 기판의 불균일도 측정 장치 - 입체 내시경 광학계 및 조명계 : 3건 - 집광향상 기능을 갖는 LED 조명광학계 - 링렌즈 가공 및 조립 방법 : 2건 - 마스크리스 노광장치용 광학부품(미국, 일본) - 디엠티 입체 프로젝터
---	--

고해상력시대에 아직도 범용렌즈를 사용하고 계십니까?
Pro Optics의 맞춤형렌즈는 귀사의 장비 성능을 한층 높여줄 것입니다.