

## 표준연의 결상광학기술

이윤우

한국표준과학연구원 나노광계측그룹

ywlee@kriss.re.kr

### 1 서론

시각적 정보를 입출력하거나 결상하는 광학계는 전통적인 광산업뿐만 아니라 정보통신산업, 반도체산업, 방위/우주산업, 계측기 및 의료산업 등에 요소기술로 사용되고 있다. 최근에는 독자적인 위성정보 확보를 위한 고해상도 위성카메라, 정보산업의 핵심부품인 디지털 카메라, 휴대폰 카메라, 정보저장용 광픽업, 정보표시용 LCD 백라이트, 새로운 나노광소자 등과 같은 핵심 광학소자 및 광학계에 대한 경쟁력을 높이기 위하여 초정밀 광계측 및 평가기술에 대한 수요가 급속히 증가하고 있다(그림 1 참조).

표준과학연구원은 출연연구소중에서 유일하게 광학계 제작 및 평가연구실을 운영하고 있으며 광산업체의 기술지원을 위한 시험 및 교정업무와 새로운 광학계와 광계측기술 등을 개발하고 있다. 최근에는 대구경 광학계와 미소 광소자 등과 같은 첨단 광학부품과 광학계의 제작 및 평가기술을 확보하기 위하여 정밀광학계 평가능력 확충연구를 수행하고 있다.

본 자료에서는 먼저 최근 결상광학계의 기술흐름에 관하여 간략하게 알아보았다. 그리고 표준연구원에서 수행중인 연구내용을 크게 비구면 광학기술과 광학계 평가기술로 나누어 최근 연구결과를 중심으로 소개하였다.

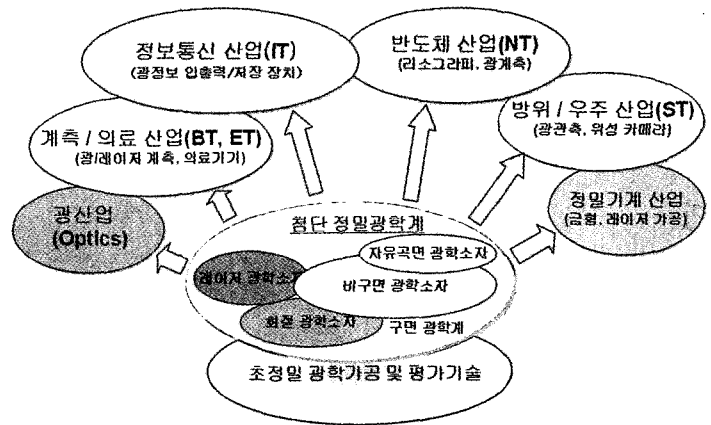


그림 1. 초정밀 광학기술의 역할

## 결상광학계 종류 및 특성

국내외에서 생산하거나 개발 중인 광학계들을 크기와 면의 형상정도로서 그림 2에 나타내었다. 그리고 DVD, 디지털 카메라, 휴대폰, HDTV, 프린트 등과 같은 디지털 기기용 소형 광학계와 인공위성 카메라와 천체망원경 등과 같은 특수 목적용 대형 광학계로 다시 나누어 최근 기술흐름을 알아보았다.

1990년대부터 전자기기들과 결합한 디지털 광학계는 직경이 1mm ~ 80mm, 형상오차는 20nm ~ 100nm 정도로서 화질을 개선하고 부품수를 줄이기 위하여 초정밀 비구면 렌즈를 주로 사용한다. 그리고 형상가변이 쉽고 저가격으로 대량생산 할 수 있는 플라스틱 재료를 광학유리와 함께 사용하며, 레이저 프린트에서는 토릭 렌즈와 같은 자유곡면을 사용한다. 이러한 광학계는 기술 경쟁이 매우 심하여 제품주기가 짧으므로 다양한 모델을 빠르고 지속적으로 개발해야 한다.

디지털 카메라와 경쟁중인 휴대폰 카메라는 올해부터 2백만 이상 화소용 줌렌즈의 대량생산을 시도함으로써 고정 초점렌즈에 비하여 개선된 비구면 렌즈의 제작과 조립, 그리고 실시간 평가기술 등의 개발을 가속시키고 있다. 고정 초점렌즈는 직경 2mm 정도이고 초점이 짧아 조립문제로 인한 수율저하가 매우 심하다.

DVD의 저장밀도를 향상시키기 위하여 405nm 광원을 사용하는 광픽업은 NA(수치구경)를 0.85로 높이기 위하여 직경 1mm ~ 2mm의 비구면 렌즈와 구면렌즈가 결합한 SIL(Solid Immersion Lens) 광학계이다. 그리고 픽업의 크기를 축소하기 위하여 광원과 검출기를 일체화시킨 다양한 기능의 회절광학소자를 함께 사용한다. 이러한 초소형 광학부품을 개발하기 위해서는 새로운 광원의 파장에서 광학계의 성능을 평가하는 기술과 반도체 공정기술을 이용한 회절광학소자 제조기술의 뒷받침이 반드시 필요하다. 최근에는 근접장 광학원리를 사용하여 NA를 2.0 가까이 크게 함으로써 저장밀도의 획기적인 향상이 가능해졌다. 그러므로 굴절률이 2정도 되는 새로운 SIL용 렌즈와 이러한 렌즈들을 수 mm 이내의 정렬할 수 있는 초정밀 조립기술이 요구되고 있다.

고해상도 인공위성 카메라와 대형 천체 망원경 개발은 미국에서 주도하고 있으며 프랑스, 러시아, 독일, 일본 등이 상당한 기술수준을 유지하고 있다. 인공위성 카메라의 경우 직경이 400mm 이상이면 전략품목으로 특별히 관리하므로 외국으로부터 기술이전이 엄격히 제한된다. 하지만 환경관측, 지도제작, 군사목적 등과 같이 다양한 수요가 급속히 증가하고 있으므로 국내 개발이 매우 시급하다. 더욱이 위성카메라는 매우 고가이나 수명이 3년 정도이므로 지속적인 교체가 필요하다. 최근에 우리나라에서는 말레이시아에 직경 300mm급 위성카메라를 수출하고 있으며, 외국과 공동 개발하여 분해능 1m급의 위성카메라를 도입하였다. 그리고 표준과학연구원에서 직경 1m급 초정밀 비구면의 제작과 조립기술을 개발함으로써 고해상도 위성카메라의 국산화를 위한 핵심 기반기술을 상당히 확보하였다.

미국에서는 직경 2.4m의 허블망원경을 대체하기 위하여 직경 6.5m의 James Webb 우주망원경을 개발하고 있다. 이것은 직경 1.2m 정도의 6각형 비구면 조각거울 18개로 구성되며 경량화를 위한 새로운 재료와 온도차가 심한 우주환경에서 성능을 유지하는 초정밀 자세보정기술들이 개발되고 있다.

지상용 천체망원경은 단일거울의 직경이 8.4m가 최대이지만 소형거울을 조립한 직경 10m의 Keck 망원경이 사용되고 있다. 최근에 미국에서는 직경 30m의 초대형 천체 망원경사업이 시작되고 있다. 이것은 직경 1.2m의 육각형 비구면 거울 618개를 조립하여 수십 mm의 형상오차를 유지해야 한다. 그러므로 초정밀 비구면 거울을 대량생산하기 위한 새로운 고속 연마기술과 많은 거울들을 정렬하기 위한 초정밀 광기계 기술들이 요구되고 있다. 그리고 유럽과 중국에서도 비슷한 사업을 계획하고 있다. 현재 직경 1m급 비구면의 일반적인 연마기간은 대략 6개월 정도이므로 이러한 사업을 원활히 수행하기 위해서는 보다 획기적인 고속 대형연마기술이 개발되어야 한다.

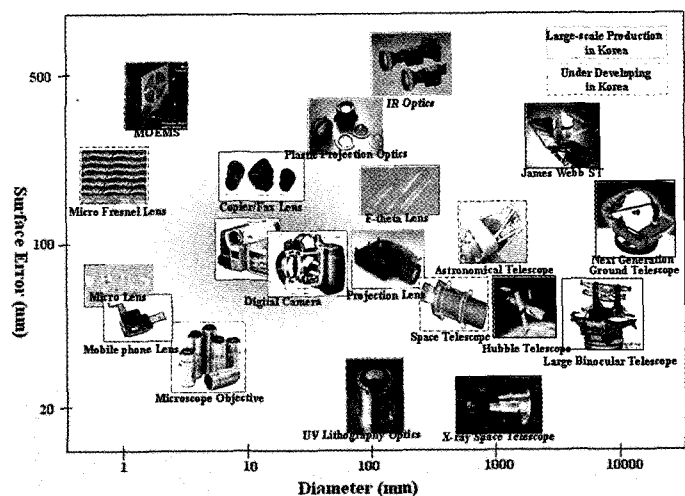


그림 2. 정밀 광학계의 종류와 특성

## 광학부품 및 광학계 평가기술

정밀광학계를 개발하기 위해서는 부품 제작단계에서 초점길이, 형상, 표면결함 등의 측정기술과 광학계를 조립하기 위한 파면수차, 그리고 최종평가를 위한 분해능측정기술 등이 필요하다. 그림 3은 렌즈들로 구성된 소형 광학계와 거울로 구성된 대형 광학계를 개발하는 경우에 대표적으로 사용되는 측정기술을 나타내었다. 가장 많이 사용하는 측정기기는 간섭계(interferometer)이며 구면이나 비구면 형상과 파면수차 등을 측정한다. 조립된 광학계를 성능평가하기 위해서는 반드시 변조전달함수(Modulation Transfer Function)를 측정한다. 표준과학연구원에서는 이러한 측정기술들을 대부분 자체적으로 개발하였으며, ISO(국제표준화기구) 등의 규격과 일치하도록 표준화 연구를 지속적으로 하고 있다. 본 연구원에서는 최근에 직경 1m급 대형 광학거울과 광학계, 그리고 초소형 광학계의 시험 및 평가를 위한 비구면 형상측정기술, 표준 비구면 가공기술, 실시간 평가기술 등을 관련 산업체와 협력하여 중점적으로 개발하고 있다.

## 비구면 형상측정기술

비구면의 형상측정은 그림 4와 같이 간섭계에 의한 측정법과 비간섭적 측정법으로 크게 구분된다. 비구면 형상측정은 한가지 방법으로 이루어질 수 없으며 측정하고자 하는 변수에 따라 여러가지 방법이 조합되어 사용된다. 비구면에서 면의 곡률반경의 측정, 원추곡면계수의 측정 등 거시적 변수의 측정은 간섭계를 이용한 측정법으로는 어려우며 비간섭적인 방법이 사용된다. 반면에 거시적 변수가 아닌 면형상 정도의 측정에는 간섭계에 의한 측정법이 가장 정밀한 측정방법이다.

대구경 비구면에서 형상 변수(면의 곡률반경, 원추곡면계수 등)의 측정은 그림 5와 같이 가공 단계별로 다양한 측정법들이 사용된다. 초기과정에서는 3차원 형상측정기, spherometer, Hartman test, Knife-edge test 등이 사용된다. 정밀한 면형상의 측정에는 null 광학계를 사용하는 간섭적 측정법이 사용되고 있으며, null 광학계로는 굴절계, 반사계, Catadioptric계, 회절광학계가 사용된다.

F-수가 비교적 크고, 구경 1~2m 정도의 오목반사경의 평가에는 null 렌즈가 주로 사용되며, 초정밀 광학계의 경우에는 광학유리의 굴절률 불균일성 및 불확실성에 의한 오차를 최소화하기 위하여 null 반사경계가 사용된다. Hologram, CGH(computer generated hologram), zone plate 등을 사용하는 회절형 null 광학계에서 null 렌즈 또는 null 반사경은 lithography 기술을 이용하여 제작한다.

광 pick-up, CCD용 소형 camera 렌즈, laser printer 등에서 면형상의 정밀도가 높지 않은 소구경 비구면의 평가는 주로 3차원 형상측정기를 이용한 직접적인 형상측

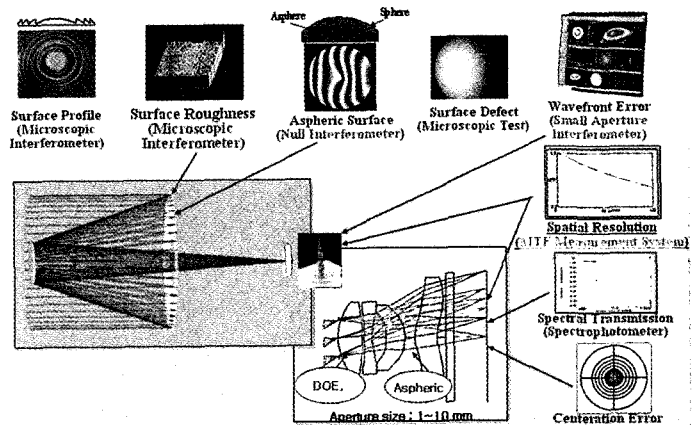


그림 3. 광학계 개발을 측정 및 평가기술

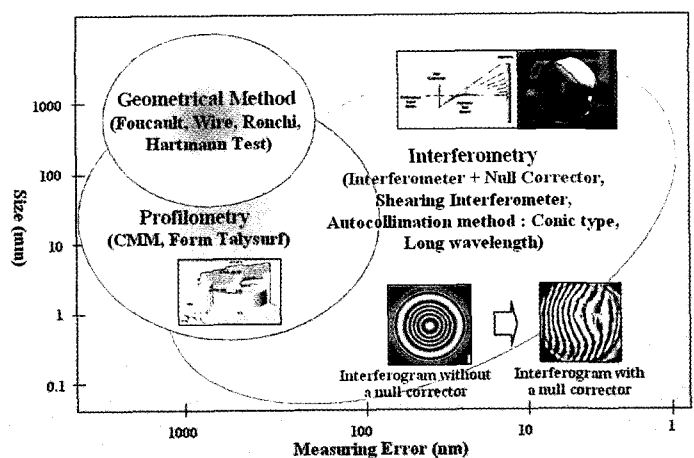


그림 4. 비구면 형상측정법

정법을 많이 사용한다. 본 연구원에서는 정렬기능이 있는 CGH null 렌즈를 사용한 소구경 비구면의 간섭적 평가법과 표준 비구면을 개발하여 산업계에 보급하고 있다.

그림 6은 직경 600mm 오목 쌍곡면의 형상을 CGH를 사용하여 측정하였다. CGH는 자체적으로 설계한 후 laser writing 방법으로 제작하였으며, 정밀한 정렬을 위하여 간섭계와 시험 비구면의 간격 확인을 위한 기능을 부여하였다.

그림 7은 볼록 쌍곡면의 형상측정방법과 결과이다. 기준 오목구면을 사용하는 Hindle 방법으로 측정하였으며, 쌍곡면의 가장자리 마모를 방지하기 위하여 보조판을 사용하였다.

그림 8은 자체적으로 제작한 직경 1.2m 비구면 연마기를 사용하여 직경 1m 포물면과 0.9m 쌍곡면의 연마과정과 측정 결과이다. 포물면은 Newtonian 시준장치용이며 평면 기준거울을 사용하는 자동시준법으로 형상측정하였다. 형상오차는 20nm rms 이하로서 초정밀급이다. 쌍곡면은 위성 카메라 구조의 시준장치의 주경이며 무게를 70% 이상 경량화 하였다. 비구면 형상은 구면렌즈 2개를 이용한 null 렌즈를 제작하여 사용하였다. 그리고 비구면 측정영역을 크게 하기 위하여 Hartmann법을 함께 사용하였다.

그림 9는 크린룸에서 비구면 형상측정과 광학계조립과정이다. 연마한 비구면은 크린룸의 연구실로 이동하여 측정과 조립을 한다. 초정밀 비구면은 위성카메라, 휴대폰 렌즈, 반도체 장비 등에 사용되므로 환경이 매우 청결하고 항온항습이 되는 곳에서 조립하여야 한다.

그림 10은 표준 비구면의 개발과정을 나타내었다. 산업체에 많이 사용하는 Form Talysurf와 profilometer 등의 측정결과를 null 렌즈를 이용한 간섭법과 비교함으로써 측정결과를 보정한다. 현재 개발한 표준 비구면은 그림 4에서 공통영역에서 사용할 수 있는 것이며, 산업체에서 요구에 따라 다양한 비구면을 제작하여 보급하고 있다.

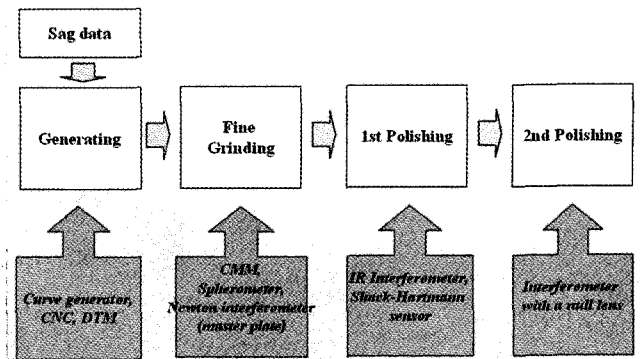


그림 5. 초정밀 비구면 제작을 위한 단계별 형상측정법

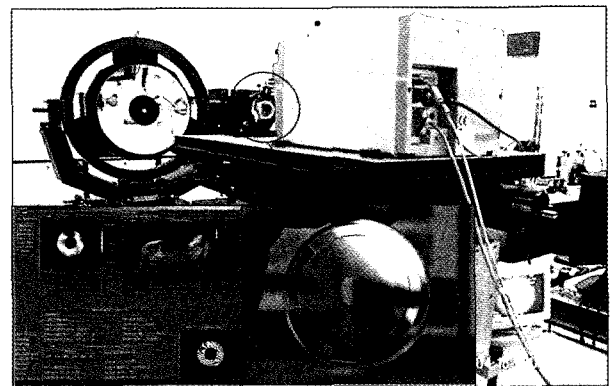


그림 6. CGH null 렌즈를 이용한 오목 쌍곡면 형상측정

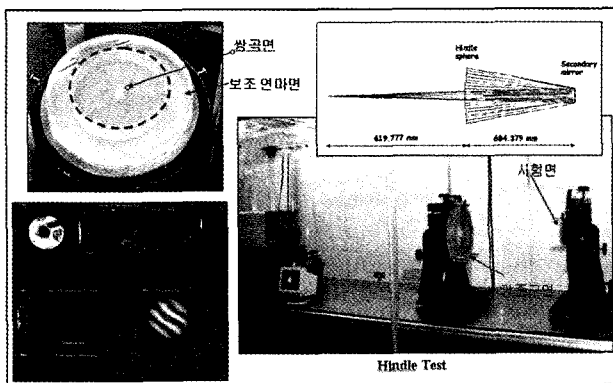


그림 7. Hindle 방법에 의한 볼록 쌍곡면 형상측정

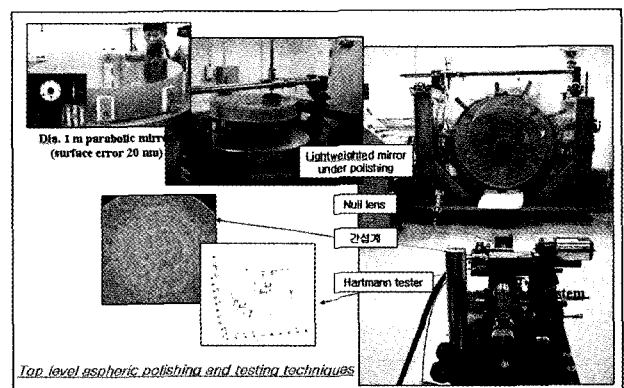


그림 8. 직경 1m 급 연마 및 비구면 형상측정

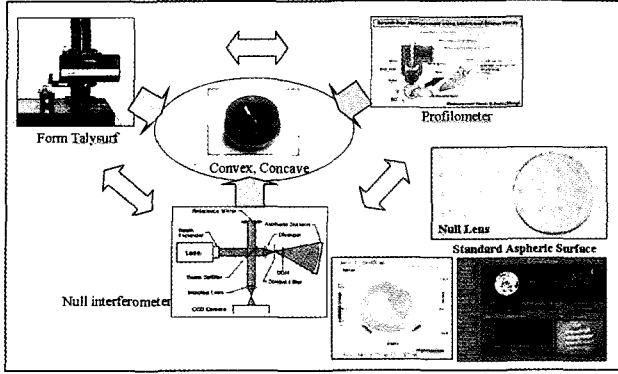


그림 9. 표준 비구면 제작 및 측정방법

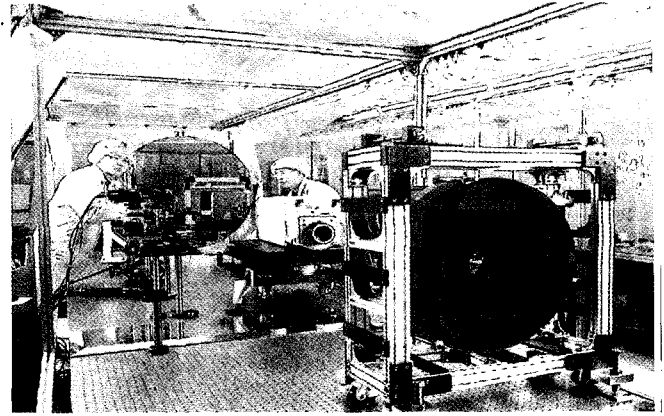


그림 10. 비구면 형상측정 및 광학계조립

## 5 광학계 평가기술

사용목적에 적합한 광학계를 선택하거나 새로운 광학계를 개발하기 위해서는 그 성능을 정확하게 평가하는 것이 매우 중요한 일이다. 현재 세계적으로 객관성이 인정되는 결상계 성능평가방법은 광전달함수(OTF : Optical Transfer Function)를 측정하는 것이며 매우 종합적이고 효과적인 방법이므로 국제표준화기구(ISO)에서도 인증하여 널리 보급되고 있다. 그리고 표준연구원에서는 광전달함수 측정장치를 자체적으로 개발하여 표준화하였으며 관련 광산업체에 지속적으로 보급하고 있다.

최근에 광학계 성능은 매우 향상되어 대량생산되는 공정에서는 실시간 변조전달함수(MTF : Modulation Transfer Function) 측정기술을 요구하고 있다. 실시간 측정기술은 시야각에 따른 여러개의 물체에 대하여 고속으로 측정할 수 있어야 하므로 CCD를 이용한 디지털 주사방법이 사용된다. 하지만 물체의 크기에 따른 각도오차와 CCD의 구조에 의한 측정오차 등의 많은 문제가 있으므로 아직까지는 널리 사용되지 못하고 있다.

그림 11은 분해능이 급속도로 향상되고 있는 디지털 카메라 광학계를 공정에서 평가할 수 있도록 제작한 실시간 변조전달함수 측정장치이다. 측정을 단순화시키기 위하여 다중 사각형 물체를 이용하며, 상분석은 CCD를 이용한 디지털 주사방법으로 변두리 퍼짐함수(edge spread function) 측정기술을 사용하였다. 시험 광학계의 초점거리와 수차 등의 측정이 가능하며 자체적으로 교정할 수 있도록 하였고, 줌렌즈에 대한 전체 측정시간은 30초 정도이다.

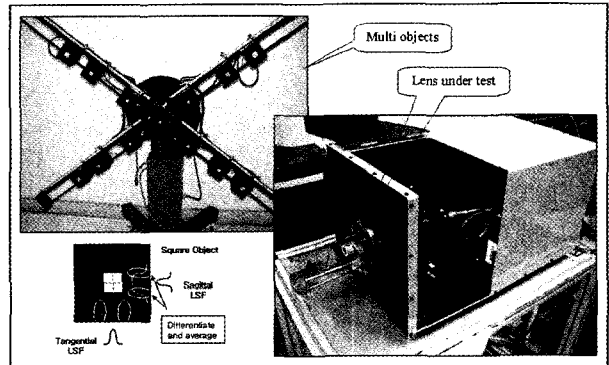


그림 11. 사각물체를 이용한 고해상도 디지털 카메라 성능 평가장치

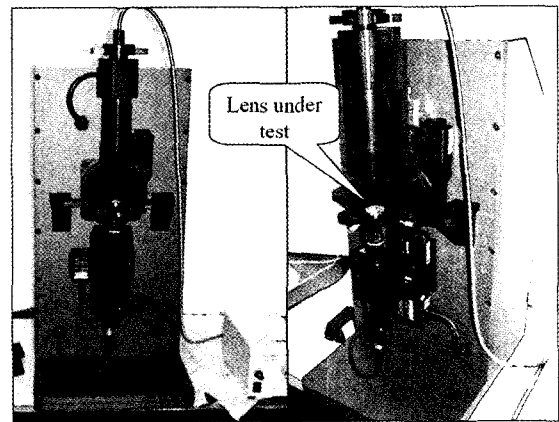


그림 12. 고해상도 줌렌즈 성능평가장치

그림 12는 휴대폰 렌즈를 성능평가하기 위하여 개발한 변조전달함수 측정장치이다. 시준장치가 좌우로 회전함으로써 비축물체를 형성하며 백색광 변조전달함수와 초점거리, 왜곡수차 등을 측정할 수 있다. 측정시간은 10초 이내이며 삼성전자 등에 보급하였다.

그림 13은 대형 광학계를 성능평가하기 위하여 제작중인 직경 0.9m 시준장치이며 f/11의 Cassegrain 형이다. 시야각은 0.17도이며 파면수차는 12nm rms 이하이다. 전체 구조는 위성카메라와 같은 형태이며 주경은 경량화 하였다. 현재 주경과 부경의 연마가 끝났으며 carbon composite로 제작한 부경 연결부위를 조립하고 있다.

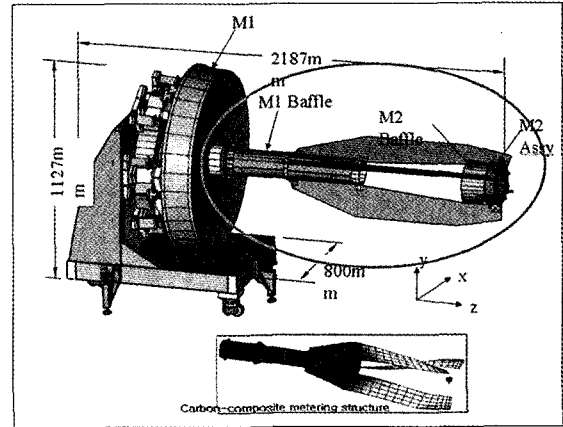


그림 13. 대구경 광학계 성능평가용 직경 0.9m 시준장치

## 결 론

국내 광산업은 70년대 초반 일본에서 기술이전 받아 쌍안경, 카메라 렌즈 등을 단순생산하면서 시작하였다. 그러나 불과 30년 만에 디지털 카메라, 레이저 프린터, 복사기, 휴대폰 렌즈, 투사렌즈, 광픽업 등을 대량생산하고 있으며 인공위성카메라, 천체망원경과 같은 고급 광학계를 전문기관에서 연구개발하고 있다. 이와 같이 매우 짧은 기간 내에 광기술을 급속하게 발전시킨 사례는 세계적으로 매우 드물다.

한편으로는 IMF를 거치면서 많은 대기업들이 사업을 포기함으로써 중소기업 위주로 개편되었다. 전체적인 시설투자는 일시적으로 줄었지만 기술력 중심의 전문기업들이 많이 생겼고, 다행스럽게도 삼성전자 등에서 지속적으로 관련 산업을 유지함으로써 새로운 도약기를 맞이하고 있다.

표준연구원에서는 앞에서 언급한 비구면 가공 및 측정과 광학계 평가기술 외에도 나노광소자 측정 및 평가, 비구면 실시간 형상측정, 플라스틱 광소자 복굴절 측정, 대형 비구면 자동연마, 회절광학소자 설계, 제작을 위한 laser writing 기술, 무진동 간섭계 개발, 정보표시장치 평가 등 많은 연구를 수행하고 있다. 이러한 연구들은 대부분 관련 기업체와 긴밀히 협력하여 진행함으로써 산업체의 경쟁력을 향상시키는데 일조하고 있다.

국내에서 개발 중인 산업용 혹은 특수목적용 광학계는 개발경쟁이 매우 심하거나 제재가 많은 경우이므로 계속적으로 경쟁력을 유지하기 위해서는 자체적으로 개발능력을 확보하여야 한다. 특히 제조단가를 낮추기 위하여 중국 등에서 제작하는 경우에도 설계와 평가능력은 반드시 보유하여야 지속적으로 신제품 개발을 할 수 있다.