

# 계측용 렌즈

렌즈를 계측에 이용하는 역사는 오래 되었으며, 그 응용 범위도 상당히 넓다. 광을 사용함으로써 비접촉 및 비파괴로 측정 대상물을 그대로 유지하면서 정보를 얻는 광의 직진성 및 고속 전파성을 이용할 수 있으며, 파장을 기준으로 한 계측이 가능함과 동시에, 특히 렌즈는 대상물의 정보를 결상에 의해 공간적으로 이동할 수 있다는 장점을 가져 각종 계측 기기에 폭 넓게 사용되고 있다. 본 고에서는 렌즈 응용 기기에 사용하는 렌즈를 분류한 후, 계측과 관련된 렌즈를 계측용 렌즈로 채택하여 그 현상과 동향을 정리하며, 요소 기술로서 렌즈 설계 및 제작 전반과 관련된 공통 기술 과제를 몇 가지 채택하여 로드맵으로 만들었다.

편집자 주

## 1. 렌즈 응용 기기와 사용 렌즈

렌즈는 관찰, 기록, 전송, 계측, 가공 및 여러 가지 목적으로 사용되고 있으며, 렌즈를 이용하는 기기는 셀 수 없이 많다.

이들에 사용하는 렌즈를 포함한 광학계가 선진 기술이 채용됨에 따라 변화를 거듭해 왔으며, 렌즈, 기구, 전기 장치가 일체적으로 토털 퍼포먼스를 제공하도록 융합되고, 고도의 광학계가 잇따라 나오고 있어 앞으로도 변화를 거듭하면서도 계속 이용될 것으로 기대된다.

### 1) 각 분야에서의 렌즈 응용 기기와 사용 렌즈

각 분야의 주요한 렌즈 응용 기기와 이들에 사용되는 렌즈를 표 1에 나타내었다. 그 분야는 엔터테인먼트를 비롯하여 의료, 통신, 오피스, 각종 공업, 우주로 다양하다.

### 2) 렌즈의 기능

렌즈의 역할은 대상물에서 나온 광을 상으로 형성하고, 광 에너지를 이용하여 물체의 정보를 전달하는 소자이다.

렌즈에서 전달하는 물체의 정보는 기하학적 형상, 미세 구조의 선명도, 밝기, 색이 기본인데, 에너지 전송만을 목적으로 한 렌즈도 있다. 이용하는 대상물도 파장 정도로 미세한 세포, 회로 소자에서 크게는 지구, 우주 규모까지 다양하다.

렌즈에서 이용하는 파장 영역은 파장이 짧은 순서대로 자외 영역(UV, DUV), 가시 영역(VIS), 근적외 영역(NIR), 적외 영역(IR)이 있으며, 파장을 기준으로 하면 수 100nm에서 수 10 $\mu$ m로 다양하다. 또한 파

옵토 메카트로닉스 계측 기술 로드맵

표 1. 각 분야의 렌즈 응용 기기와 사용 렌즈

분야	렌즈 응용 기기	사용 렌즈
엔터테인먼트	카메라	사진 렌즈 촬영 렌즈
	디지털 카메라 비디오	촬영 렌즈
	카메라 CD, DVD	픽업 렌즈
	스캐너	주사 렌즈
	망원경, 쌍안경	대물렌즈, 접안 렌즈
	영화촬영기, 영사기	촬영 렌즈, 영사 렌즈
	TV 방송 기기	TV 촬영 렌즈, HDTV 촬영 렌즈
의료용, 의료	안과 교정	안경 렌즈, 콘택트 렌즈, 안내(眼內)렌즈
	안과 의사용 기기	비구면 대물 렌즈
	내시경	내시경 렌즈
	서모그래피	적외선 렌즈
	검사 현미경	현미경 대물 렌즈
통신	팩시밀리	마이크로 렌즈 어레이
	휴대전화	촬영 렌즈
	광 통신	마이크로 렌즈, 마이크로 렌즈 어레이
오피스	복사기	복사 렌즈, 셀폭 렌즈
	레이저 프린터	f $\theta$ 렌즈
	오버헤드 프로젝터	투영 렌즈
	데이터 프로젝터	조명 렌즈, 투영 렌즈
인쇄	제판 카메라	사진 제판 렌즈
반도체 공업	리소그래피 장치	축소 투영 렌즈
	검사 현미경	현미경 대물 렌즈
공업	축정 투영기 축정 현미경,	투영 렌즈
	영상 측정기	현미경 대물 렌즈
	각종 검사기	촬영 렌즈, 텔레센트릭 렌즈
	오토 콜리메이터,	콜리메이터 렌즈
	확대기(expander)	콜리메이터 렌즈, 빔 확대기
	CCTV	CCTV 렌즈
측량	세오드라이트, 수준	대물 렌즈
운수 및 교통	자동차 헤드라이트,	집광 렌즈
	도로 조명 등대	프레넬 스크린
항공, 우주	항공 카메라	항공 카메라 렌즈
	인공위성 탑재 카메라	FOV 렌즈
	천체 망원경	오목거울, 카세그레인 망원경

장이 짧은 진공 자외 영역(EUV)과 X선 영역도 있다.

렌즈 소자로는 굴절계, 반사계, 반사 굴절계의 기하 광학 소자, 회절 광학 소자 및 액

표 2. 기능에 의한 렌즈의 분류

기능	렌즈의 예
관찰계	안경렌즈, 콘택트렌즈, 안내렌즈, 접안 렌즈, HMD용 렌즈
망원경계	망원경 대물 렌즈, 반사 대물 렌즈, 천체 망원경 반사경, 콜리메이터 렌즈, 간섭계 렌즈, 확대기
확대계	현미경 대물렌즈, 축소 투영기 투영 렌즈
등 배계	복사기 렌즈, 릴레이 렌즈
축소계	사진렌즈, 디지털 카메라 촬영 렌즈, 광 디스크 렌즈, CCTV 렌즈, TV 촬영 렌즈, HDTV 촬영 렌즈, 리소그래피용 렌즈, 사진제판 렌즈, 마이크로사진 렌즈, 사진 측량용 렌즈, 항공 사진 렌즈, 인공위성 탑재 렌즈
변배계	줌 렌즈, 베리포컬 렌즈
주사계	f $\theta$ 렌즈, 아크사인 렌즈, 복사 렌즈, 마이크로 렌즈 어레이 광 디스크용 렌즈, 스캐너 렌즈
비결상계	조명 렌즈, 푸리에 변환 렌즈, 아포컬 렌즈, 집광렌즈, 광기록 렌즈

정 광학 소자가 있는데, 일반적으로는 이 굴절계를 렌즈라 부른다. 렌즈가 갖는 기능인 관찰계, 망원경계, 확대계, 축소계, 변배계, 주사계, 비결상계 등으로 렌즈를 분류하면 표 2와 같다.

3) 렌즈 응용 기기의 동향

렌즈 응용 기기는 다른 기기와 마찬가지로 전자화, 소형화, 마이크로화가 커다란 흐름이다. 전자화의 경우 영상 입력 소자로서 CCD를 사용한 비디오 카메라나 디지털 카메라가 널리 보급되고 있으며, 표시 소자로는 CRT 모니터도 LCD(액정 표시 디스플레이)나 플라즈마 디스플레이를 대신하고 있으며, 파인더도 광학식에서 LCD로 변화되고 있다. 현미경 등 눈으로 관찰하는 광학계마저도 CCD로 촬상한 상을 CRT뿐만 아니라 LCD 모니터로 관찰하도록 되어 있다. 또한 LCD나 DMD(디지털 마이크로 미러 장치)로 대표되는 라이트 밸브를 표시 소자로 한 DLP(디지털 광 처리) 프로젝터 등이 보급되었으며, HMD(헤드 마운트 디스플레이)도 등장하였다. 프린터 광학계는 f $\theta$  렌즈를 사용한 레이저 주사 광학계가 빠르게 보급되었다. 또한 영상 처리는 현저한 발전을 거듭했으며, 이를 지탱하고 있는 것은 소프트웨어를 포함한 컴퓨터 기술의 비약적인 발전이라는 사실은 새삼 언급할 필요도 없다.

## 2. 계측용 렌즈

일반적으로는 계측 수단에 맞추어 계측용 렌즈를 개발하는데, 다른 분야의 렌즈 중에서 선택되어 사용되는 경우도 많다. 계측기기 전용으로 개발된 렌즈가 일반화되면 그 계측명이 붙은 렌즈가 탄생된다. 렌즈의 사양은 계측 수단에 좌우되는데, 새로운 요소 장치가 나타나 주변 기술에 혁신이 일어나거나 측정 대상으로 새로운 분야가 나타난 경우에 크게 변화된다. 계측용 렌즈도 기술 전체의 동향이나 발달에 크게 의존하고 있으며, 일반용과 마찬가지로 전자화에 대응하는 것으로 파장 영역 확대, 고성능화, 마이크로화의 경향이 있다. 계측용 렌즈가 어떠한 계측 항목에 이용되는가를 기하 형상, 표면 형상, 분광·색, 온도로 분류하여 표 3에 나타내었다. 계측용 렌즈의 로드맵을 그림 1에 나타내었다.

표3. 주요한 계측용 렌즈와 계측 항목

렌즈	기하형상	표면형상	분광·빛깔	온도
현미경 대물렌즈	○	○	○	
리소그래피용 렌즈	○			
텔레센트릭 계측 렌즈	○			
광주사용 렌즈	○			
콜리메이터 렌즈	○	○		
광 픽업 렌즈	○		○	
마이크로 렌즈 어레이		○		
X선 광학 소자		○	○	○
천체 망원경 반사경		○	○	

### 1) 현미경 대물 렌즈

현미경은 미세한 물체를 확대하여 관찰하거나 계측에 사용하는 장치로 널리 이용되고 있으며, 완성도도 높고 발달된 기기로서, 다양한 요구에 따라 발전되고 있다. 사용 방법이 바뀌더라도 주요 부분인 대물 렌즈가 중요하다. 무수차로 회절 한계의 성능을 가지고, 고개구율과 고분해능을 가지며, 최근에는 고분해능을 유지하면서 작동 거리를 길게 잡는 것으로 현미경의 조작성을 향상시켰다. 또한 관찰 시야도 커지고 있다.

현미경에는 일반적인 명시야 현미경 이외에 형광 현미경, 암시야 현미경, 공초점 현미경, 레이저 현미경, 3차원 영상 측정기, 현미 분광 장치, 현미 간섭계, 마이크로 레이저

가공기 등이 있다. 미래의 현미경으로서 각종 레이저 현미경이 고안되고 있다. 2개의 대물 렌즈를 마주보게 하여 초점을 일치시켜 입체각이 4π이므로 4π광학계로 명명된 현미경이 있으며, 100nm를 넘는 분해능을 나타낸다. 펄초 레이저를 광원으로 하는 2광자 여기 형광 현미경, 코히런트 스토크 라만 산란 현미경에 의한 분자 이미징 등이 있다.

### (1) 영상 계측

확대한 이미지를 CCD 카메라로 불러들여 컴퓨터를 이용한 영상 처리에 의해 상면 내의 측정이 이루어진다. 스테이지의 이동에 의한 측정을 조합하여, 렌즈의 시력보다 넓은 범위를 계측하는 2차원 영상 측정기가 출현했으며, 나아가 오토 포커스에 의한 초점 위치 정보를 불러들여 Z축 측정을 포함시킴으로써 3차원 영상 측정기가 탄생하였다.

### (2) 반도체 관계

반도체의 미세화의 흐름 속에서 노광 마스크 검사에서 약 100nm 이하의 결함 검출 능력이 요구되고 있으며, 위상 시프트 마스크도 검사되므로, 노광기의 엑시머 레이저의 노광 파장과 동일한 파장의 조명 광원이 필요하다. 이에 필요한 결상 광학계로서 DUV의 대물 렌즈가 있다. 예를 들면 파장 257nm에서 NA 0.75 초점 거리 9mm가 사용되고 있다. 무한 보정계로서 결상 렌즈를 선택하여 필요한 배율로 만들어 사용할 수 있다. F2 레이저 157nm를 사용한다고 하면 동일한 대물 렌즈가 필요해진다.

### (3) 간섭 계측

미세 형상, 단차 등의 측정에 현미 간섭계가 사용된다. 간섭 유형으로는 피조, 트와이만 그린, 리니크, 미로 등이 있다.

### (4) 분광 계측

미세 부분의 분광 측광이나 분광 영상의 요구에 따라 종래부터 사용되었으며, 적외 분광 분야에서는 반사 대물 렌즈가 사용된다.

### (5) 마이크로 가공

현미경 대물 렌즈를 사용하여 레이저로 조사한 마스크를 물체 위에 투영하여 가공하는 마이크로 가공이 행해지고 있

옵토 메카트로닉스 계측 기술 로드맵

다. LSI, LCD 등의 마스크의 수정 등에 이용된다. 앞으로는 2광자 흡수를 사용하는 나노 광조형이 기대되고 있다.

2) 리소그래피용 렌즈

LSI 기술을 예측하는 로드맵은 1998년부터 5극으로 확대되어 국제 반도체 기술 로드맵으로서 발표되었다. 회로의 밀도를 향상시키기 위하여 보다 좁은 하프 피치의 패턴이 만들어지게 되었으며, 100nm 이하의 패턴이 실제로 소자에 사용되기 시작했다.

집적 회로는 대부분이 광 리소그래피에 의해 제조되고 있다. 레티클 또는 마스크라 불리는 원판의 상을 노광 장치에 의해 실리콘 웨이퍼 상에 도포된 레지스트 내에 형성하여 현상된 레지스트 아래의 실리콘 또는 다른 금속 등을 식각하여 전자 회로를 형성하는 것이다. 이 장치에 이용하는 렌즈가 리소그래피용 렌즈 또는 축소 투영 렌즈라 불리우며 주요 부분으로 되어 있다.

노광 장치(스테퍼, 스캐너)가 고밀도화를 위한 기술적 발전의 중심을 이루고 있다. 고해상화를 위한 기술에는 인핸스먼트 및 노광 파장을 짧게 하여 광학계의 NA를 크게 하여 광학계의 설계 제조 정밀도를 향상시키는 것을 들 수 있다.

(1) DUV 심자의

KrF 레이저파장 248nm를 이용한 광학계는 석영과 형석에 의한 굴절 광학계이며, 마스크는 투과형을 이용하고 있다. F<sub>2</sub> 레이저 157nm를 사용하는 광학계에서는 형석만이 이용할 수 있는 재료이지만, 색수차 보정이 필요하기 때문에 반사 굴절계가 고려된다. 위상 시프트 마스크의 관계에서 중심 차단이 없는 반사 굴절계가 가장 유력한 후보이다.

(2) EUV 극자의

파장 13nm의 X선을 이용한 광학계는 반사 광학계이며, 마스크는 반사 기판을 이

용한다. 조명의 균일성을 어떻게 얻을 것인가, 노광의 광 흡수에 의한 반사 미러의 열 변형, 반사면의 표면 조도를 어떻게 감소시킬 것인가 등 많은 과제가 있다. 조명의 균일화는 반사형의 플라이즈아이렌즈가 유망시되고 있다.

3) 텔레센트릭 계측 렌즈

상면 상에서의 레티클, 마스크와의 비교에 의한 측정은 3차원의 측정물을 2차원의 상면에 결상시킴으로 결상 배율의 정밀도가 중요해지고, 초점 조정이 어긋나도 배율이 변화되지 않도록 해야 한다. 이러한 목적으로 생각해 낸 것이 텔레센트릭 광학계이며, 종래부터 치수 계측에 사용하는 측정 투영기용의 투영 렌즈나 측정 현미경의 대물렌즈는 측정물측에 텔레센트릭(telecentric)한 구성으로 하여, 상의 중심을 검출하면 희미해지더라도 위치 어긋남은 발생하지 않는다는 원리를 이용한다.

영상을 이용하여 저배율 또는 축소 배율로 형상을 측정하는 경우, 텔레센트릭 조리개를 작게 하면 측정물측의 NA가 작아지고, 따라서 초점 심도가 깊어져 큰 단차를 갖는 측정물에서 초점 조정을 하지 않고도 측정할 수 있으며, 영상 계측과 조합시켜 공업 분야에서 사용되고 있다.

측정물측과 상측 양측 모두가 텔레센트릭한 리소그래피용 렌즈는 정밀도를 상당히 많이 요구하는 예이다.

4) 광 주사용 렌즈

물체를 주사하여 정보를 얻기 위하여 렌즈의 시야 중앙만을 사용하는 경우와 시야 전체를 사용하는 경우가 있다. 집광 스폿으로 주사하는 광 디스크 장치는 전자의 예이며, 시야 전체를 일괄 결상하는 광학계를 이용하여 라인 센서를 사용하는 스캐너, 포인트 형상으로 기록하는 레이저 프린터, 포인트 센서를 이용하여 형상 치수를 측정하는 장치 등이 후자의 예이다.

(1) 스캐너 렌즈

2차원 영상 입력으로서의 스캐너에 사용하는 렌즈로서, 스캐너로 입력한 영상을 사용하여 계측에 이용한다. 스캐너식 리소그래피 장치도 동일한 기능을 갖는다.

(2) 광 절단 주사 렌즈

비접촉 3차원 디지털이저로서 3차원 계측에 사용하기 때

문에, 슬릿 형상의 레이저광으로 측정 대상을 주사하고, 그 반사광을 렌즈를 장착한 CCD 카메라로 받아 삼각 거리 측정의 원리로 대상물과의 거리 정보를 얻는다. 렌즈 자체는 왜곡 수차를 보정한 렌즈가 사용된다.

### (3) f $\theta$ 렌즈

레이저 프린터용에 폴리곤 미러를 이용하여 주사하기 위하여 개발된 것으로, 반도체 레이저(LD)를 이용하여 광학계의 소형화 및 저비용화를 이루고, 멀티 빔 광원에 의한 LD 어레이 방식, 복수의 LD 광속을 합성하는 방식이 개발되어 고속기에 탑재되어 있다.

f $\theta$  렌즈는 종래의 구면 및 트로이달면 대신 만곡(灣曲)축형 트로이달면 등의 자유 곡면이 채용되고, 상면 만곡의 감소, 주사 등의 속도성 향상, 렌즈 수 감소에 크게 공헌하고 있다. f $\theta$  미러도 사용되며, 사입사에 의해 발생하는 주사선의 휨이나 파면 수차를 보정하기 위하여 모션을 만곡 또는 기울인 자유 곡면 미러가 발표된 바 있다. 폴리곤 미러의 다면화에 의한 고속화를 목적으로 한 오버 필드 광학계가 실용화되어 왔다. 이 광학계의 과제인 파면 수차 감소, 광이용 효율 향상에 대한 접근이 진행되고 있다.

계측 분야에서는 f $\theta$  렌즈를 텔레센트릭한 배치로 하여 광축에 평행하게 한방향으로 일정 속도로 빔을 주사하며, 그 빔을 집광 렌즈로 광 센서에 모은다. 주사 빔 사이에 측정물을 두고 얻어진 신호로부터 엣지 신호를 얻는다. 통상적으로 빔의 주사 횟수는 시간 측정 분해능을 정하는 클럭 주파수와 관련이 있지만, 폴리곤 미러의 속도와도 관련이 있으며, 초당 400~800회이다. 측정 범위는, 회전각이 일정하다면 렌즈의 초점 거리 f로 정해진다.

### 5) 콜리메이터 렌즈

콜리메이터 렌즈는 평행한 광속을 얻기 위한 렌즈로서, 각도를 측정하는 오토 콜리메이터나 광속을 넓히기 위한 빔 확대기 및 간섭계의 렌즈로서 사용된다.

간섭을 이용한 형상 측정의 장점은 큰 면적을 한번의 측정으로 쥘 수 있고, 광 파장을 길이 기준으로 추적할 수 있기 때문에 측정값의 신뢰성이 높다. 넓은 면의 평면 측정에는 피조 간섭계가 사용되는데, 그를 위해서는 대형 콜리메이터 렌즈가 필요하다.

### 6) 광 픽업 렌즈

광 디스크 시스템은 이용 범위를 넓혀 시장을 확대하고 있다. 데이터의 기록, 재생을 위하여 반도체 레이저를 회절 한계점에 집광하는 대물 렌즈는, 현재로는 한 장의 비구면 플라스틱 렌즈로 이루어져 있으나, 온도 특성이 우수한 유리 몰드 비구면 렌즈도 사용되고 있다. 광자기 기록용에서는 회절 작용으로 색 수차를 보정하는 회절 굴절 복합 렌즈도 사용되고 있다. 최근에는, CD와 DVD의 두께가 서로 다른 디스크에 대응하는 “호환” 시스템을 위하여 다른 NA를 사용하는 렌즈가 고안되었다. 렌즈 직경 방향을 복수의 영역으로 분할하여 특수한 구면 수차를 부여하여 점 이미지(点像)의 형상을 제어하는 렌즈, 파장 차이로 구면 수차의 보정과 온도 특성을 개선하는 대물 렌즈 등, 불연속면이나 위상 시프트를 이용한 렌즈가 호환 방식의 주류를 이루고 있다.

청색 레이저 405nm를 광원으로 하여 NA 0.85의 렌즈를 사용하는 “DVD-”시스템이 출시될 예정이다. 나아가 그 이전에 다파장, 다층, 근접장 효과 등을 사용하는 고밀도 기록 방식을 고려하고 있어 렌즈는 더 새로운 발전 국면을 맞이하고 있다. 포커스나 트래킹 에러를 검출하기 위한 홀로그래픽 광학 소자도 반도체 레이저나 프리즘 등과 일체화되어 광 픽업의 소형화에 크게 공헌하고 있는데, 앞으로는 광학계 전부를 광 칩으로 하여 일체 집적화하는 방향으로 진행될 것이다.

계측 분야에서는 포커스 서보를 걸어 렌즈를 주사하며, 미세 형상, 조도 등의 계측에 이용하고 있다.

### 7) 마이크로 렌즈 및 마이크로 렌즈 어레이

광 픽업 렌즈도 마이크로 렌즈의 범주에 들어가지만, 그와는 별도로 파이버 커플링이나 반도체 레이저에 관련된 콜리메이터로서도 사용된다. 셀폭이라 불리는 구배, 인덱스 렌즈도 사용되고 있다.

마이크로 렌즈 어레이는 일반적으로는 균일한 굴절률을 갖는 유리나 플라스틱으로 만들어지는데, 기판 내에 이온을 선택적으로 확산시킴으로써 제조되는 평판 마이크로 렌즈도 있다. 이온 교환 후 표면을 평면으로 연마하는 굴절률 분포만을 이용하는 타입과 부분적 팽창도 이용하는 타입이 있으며, 광 통신 분야(고밀도 파장 다중 통신)의 분파 합파 모듈이나 광 매트릭스 스위치로의 이용이 고려되고 있다.

옵토 메카트로닉스 계측 기술 로드맵

공초점 현미경에서 CCD의 화소와 동일하게 배열한 마이크로 렌즈 어레이에 대응한 핀홀 어레이를 사용하며, 니프코브 디스크(Nipkow disk)와 같이 회전하지 않고도 구성할 수 있다는 장점도 있다.

8) X선 광학 소자

방사광이나 레이저 플라즈마 X선 소스와 같은 새로운 광원은 X선 광학 분야의 커다란 발전에 기여하고 있다. X선 영역에서는 모든 물질의 굴절률이 1보다 약간 작으며, 가시 영역과 같은 굴절 렌즈나 수직입사경을 제작하기가 어려워 광학계의 자유도가 매우 작았다. 또한 파장이 2자리수 이상 짧아 광학 소자의 가공 정밀도도 매우 얻기 어려워진다.

결상형에서는 높은 분해능 문제로 인해 존 플레이트가 사용되지만, 회전 타원면과 회전 쌍곡면을 직렬로 조합시킨 볼터 거울도 사용되고 있다. 이는 전반사를 이용한 반사경이므로, 입사각을 전반사 임계각 이상으로 해야만 한다.

오목면 렌즈를 사용하면 집광이 가능하며, 다수의 오목 렌즈를 밀착 성형하여 합성 초점 거리를 단축시킨 X선 굴절 렌즈가 있다. 이 광학 소자들에서도 서브미크론의 분해능이 얻어진다.

소프트 X선 영역의 레이저 플라즈마 X선 소스(파장 1~10nm)는 발산 광원이므로, 볼터 거울(Wolter Mirror)이나 오목면과 볼록면을 조합시킨 슈왈츠실트 거울과 같은 비교적 개구수가 큰 광학계와 조합하여 다 이용된다. 수 10nm의 분해능을 얻기가 비교적 용이하여 수 년 이내에 10nm의 분해능을 달성할 것임에 틀림없으며, 그 응용 범위는 급속히 확대될 것으로 예상된다.

울트라소프트 X선 영역(파장 10~15nm)에서는 수직 입사를 염두에 둔 다층막 거울의 개발도 주목할 만하며, 이상(理想)에 가까운 수직 입사 반사율을 나타내고 있다. 이 영역은 축소 투영형의 X선 리소그래피로서 기대가 높아지고 있다. 슈왈츠실트 거울은 대표

적인 수직 입사 광학계로서, 13nm 부근의 소프트 X선을 사용하여 선폭이 50nm 이하인 패턴 형성도 가능하게 하고 있다.

검출기로는 CCD 카메라를 사용하는 경우가 많다. 화소가 크기 때문에 에너지와 영상을 동시에 계측할 수도 있어, 앞으로는 고분해능의 영상 계측이 가능해질 것이다.

9) 천체 망원경 광학계

광학계는 반사경이 중심이나, 그 초점에서 여러 정보를 빼내기 위하여 초점 관찰 광학계를 구성하고 있다. 20세기 후반에 8~10m급의 반사경을 갖는 천체 망원경이 만들어져 관찰되기 시작했다. 지상에 설치하면 대기의 흔들림이 발생하여 보상 광학계를 투입한다. 또한 거대한 망원경인 30~100m급을 제작하고자 100m의 능동 광학 망원경에 고도의 보상 광학 시스템을 조립시켜 해상력 각도 1msec, 한계 등급 38 등을 실현할 수 있는 가능성이 검토되고 있다. 이는 태양계 이외의 혹성계를 직접 관측할 수 있는 가능성을 안고 있어, 2020년 무렵에 만들 계획이다.

3. 요소 기술

일반적인 렌즈에 공통되는 기술이다. 렌즈의 설계 제작에 관한 요소 기술로서 광학 재료, 설계 및 평가법, 기구 설계, 성능 평가를 채택하였다.

요소 기술의 로드맵을 그림 1에 나타내었다. 이 분야도 컴퓨터 이용의 고도화에 의존하고 있다.

1) 광학 재료

광학 재료가 렌즈에 크게 기여하고 있음은 논할 여지도 없다. 유리, 결정, 플라스틱이 사용되고 있으나, 색 보정에 널리 사용되고 있는 이상(異常) 부분 분산 유리가 고성능 렌즈 설계에 많은 능력을 발휘해 왔다. 앞으로는 종래부터 사용된 광학 재료뿐만 아니라, 광학 결정, 유무기 복합 재료, 원자 분자 수준에서 구조가 제어된 나노 유리 등의 새로운 재료의 출현이 기대된다.

(1) 환경 대책 유리

환경 대책 측면에서 성분으로서 PbO 등을 함유하지 않는

유리로 대체하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. PbO는 광학 유리의 고굴절률화 및 고분산화시키는 성분으로 많은 광학 유리에서 사용되었으나, 이를 TiO<sub>2</sub> 등으로 대체함으로써 환경 대책 유리가 개발되었다.

환경 대책 유리는 종래의 것에 비해 화학적 내구성, 기계적 강도, 내마모성이 향상되었다. 또한 PbO를 함유하지 않기 때문에 비중이 작아져 투과율을 악화시키는 경향이 나타났고, 일부 초차 종류에서는 단파장 및 장파장 영역에서 분산차가 나타났으며, 특수 렌즈에서는 유리의 대체로 인해 설계를 변경해야만 했다.

권장 유리라 일컬어지는 유리 종류의 대체는 이미 끝났으나, 특수 유리는 대체 진행 단계에 있다. 리소그래피용 렌즈에 사용하는 i선용 유리는 내부 투과율이 우수하고, 솔라리제이션(자외선에 의한 착색)을 상당히 억제하며, 또한 광학적 균일성을 필요로 하기 때문에 대체는 좀처럼 쉽지 않으나, 광학 유리 업체의 노력으로 이 문제를 해결하여 2010년 무렵까지는 대체가 이루어지기를 믿어마지 않는다.

**(2) 성형용 유리**

민생품의 대량 생산에 의한 비용 감소를 목표로 하여 플라스틱화가 진행되고 있으나, 온도 변화에 문제가 있는 제품에는 연마에 의한 유리 렌즈가 사용되고 있으며, 비용 감소의 필요성으로 인한 성형 가공이 널리 행해지게 되었다. 성형에 사용하는 유리는 저연화성 광학 유리가 사용된다. 종래의 광학 유리와 같거나 그와 비슷한 광학 정수(굴절률, 분산)를 가지면서, 유리를 가열했을 때 보다 낮은 온도에서 유리를 성형할 수 있는 특성을 가지며, 정밀 유리 몰딩 성형시에 금형과의 반응성을 줄여 금형의 수명 연장을 도모할 수 있다.

성형은 마이크로 렌즈뿐만 아니라, 중구경 및 대구경 렌즈, 생산수가 적은 렌즈에도 이루어질 것이므로, 광학 유리에 속하는 대부분의 유리 종류가 저연화성 광학 유리로 발전하거나, 또는 현재 그대로이더라도 성형 기술의 진보로 인해 성형쪽으로 가는 방향으로 노력이 이루어지고 있다. 환경 대책도 고려하고 있으며, 화학적 내구성 등 다른 물성은 종래의 광학 유리와 거의 동등한 성질을 나타내고 있어 정밀 유리 몰딩용 원재료로서 사용된다.

**(3) 결정**

리소그래피 광학계는 단파장화가 요구되고 있으나, 파장이 짧아지면 사용할 수 있는 광학 재료가 제한된다. 유리는 파장정도의 밀도 변동이 반드시 일어나므로 재료 내부에서의 산란이 커진다. 석영은 레일리(Rayleigh) 산란이 발생하여 상(像)면 상에서 플레어 성분으로 작용하여 문제가 발생한다. 결정인 형석은 레일리 산란을 발생시키지 않으나, 스페클이라는 결함이 석영에서의 레일리 산란과 동일한 정도로 광을 산란시킨다.

F<sub>2</sub> 레이저 157nm를 사용한 광학계에서는 투과율, 크기, 취급 용이성(연마, 조해성) 때문에 기본적으로 형석만이 현실적인 유리 종류로 간주되고 있다. 형석은 결정 대칭성 때문에 복굴절이 없다는 점에서 별 생각없이 사용되어 왔는데, 이처럼 짧은 파장에서는 편광 사이에서 약 10nm/cm의 광로점차가 커다란 문제점으로 지적되고 있다.

일반적으로 결정 재료는 원기둥 형상의 잉곳(ingot)을 절단에 의해 만들어 지는데, 이 제품화율은 10~30%로서, 이러한 낭비를 없애기 위한 기술로 정형 결정화 기술이 기대되고 있다.

**(4) 플라스틱**

플라스틱 렌즈의 고성능 렌즈에의 응용인 비구면과 회절 렌즈의 대량 생산은 광 디스크에서 시작되었다. 유기 재료가 되기 때문에 굴절률이 불안정하고, 렌즈 형상이나 성형법에 따라 변화되므로 성형 후에 굴절률을 측정하여 재설계를 해야 한다. 향후 분산 특성이 유리과 다른 재료의 개발이 기대된다.

**(5) 불균일 매질(구배 · 인덱스)**

굴절률 구배를 갖는 매질로서, 래디얼 타입은 반경 방향으로 굴절률이 변화되므로 축 방향으로 전달되는 경로는 정현파 모양이 되고, 렌즈의 작용을 하여 셸폭이라는 브랜드명의 마이크로 렌즈로서 사용되고 있다. 축사형(axial type)은 광 축 방향으로 변화되므로 구면(球面)으로 가공하면 비구면으로서의 특성을 가져 구면 수차를 줄일 수 있다. 분산이 매우 작은 렌즈도 만들어지고 있다.

**2) 설계 · 평가법**

광학 설계는 사양으로 설정된 초점 거리, 화각(畫角), NA 등의 기능, 왜곡 수차, OTF 등의 성능, 레이아웃, 온도,



옵토 메카트로닉스 계측 기술 로드맵

사용 파장 등의 경계 조건을 만족시키면서 플레어, 고스트 등의 노이즈를 제거하도록 구성한다. 광학 설계 자체는 광선 추적, 평가, 상 개선 공정으로 크게 나뉘는데, 이들은 컴퓨터를 사용하여 행해진다. 최근에는 PC의 저가격화, 고성능화에 의해 PC를 사용하는 광학 설계 소프트웨어가 상용 소프트웨어로서 많이 나와 있으며, 광학 설계 및 복잡한 광학 시뮬레이션을 누구나 어디서나 쉽게 할 수 있는 환경이 구축되었다. 렌즈가 다양화됨에 따라 소프트웨어도 다양화되었고, 렌즈 설계 및 평가 시뮬레이션 기술도 진보되어 가상 생산 시뮬레이션으로 발전될 것으로 예상된다.

(1) 최적화, 글로벌 최적화

광학계의 자동 설계에 사용되는 최적화 기법은 감쇠 최소 제곱법(DLS)이 현재 주류를 이루며, 시판중인 각종 소프트웨어에 탑재되어 있는데, 어느 한 해(解)에 집중하게 되면 성능이 향상되지 않는 상태, 소위 국소해에 빠지게 된다. 이 국소해로부터 벗어나는 것은 설계자의 판단으로 렌즈 구성을 변경하여 최적화를 시도하는 것인데, 자동으로 구하고자 하는 요구에서, 광대역(글로벌) 최적화라는 기법이 연구되었다. 통계적 기법을 구사한 방법, 생물 진화의 기구를 응용한 방법 등이 연구되었으며, 후자에서는 우수한 유전자를 남겨서 보다 적절한 해를 선택해 가는 유전적 알고리즘이다. 일단 극값에 빠진 해로부터 극값을 원래로 되돌림으로써 극값에서 벗어나며, 다른 극값의 탐색을 계속한다는 이스케이프 함수에 의한 기법도 사용되고 있다. 앞으로도 더욱 강력한 기법이 고안되어 널리 사용될 것으로 예상된다.

(2) 비구면, 비대칭계 자유 곡면, 편심

공축 광학계에 속하지 않는 비대칭 비구면을 사용하는 설계가 널리 행해지게 되었다. 편심 취급에는 방진 광학계의 설계나 렌즈 경통의 엔지니어링 플라스틱화에 따른 제조 오차의 검토에 필요한 미세 편심의 취급 및 헤드업

디스플레이에 사용하는 광학계와 같은 대편심 취급이 있다.

(3) 줌 렌즈

전자 기술의 발전은 줌 렌즈의 진보에도 큰 영향을 끼쳤으나, 강력한 광학 설계 소프트웨어에 의해 다군(multi-group) 줌 등의 렌즈 타입의 변화나 비구면의 적용을 비롯한 요소 기술의 발전에도 커다란 공헌을 했다. 비디오 카메라에서는 물체측으로부터 각각 플러스, 마이너스, 마이너스, 플러스의 굴절력을 갖는 렌즈 그룹으로 이루어진 타입에서 보다 컴팩트한 구성이 가능한 플러스, 마이너스, 플러스, 플러스 타입으로 변화되었다. 또한 비구면 렌즈가 채용됨으로써 렌즈계의 수 감소 및 컴팩트화에 크게 기여하고 있다. 전자식이나 광학식의 각종 손떨림 보정 기능 등이 소비자용으로 구현되었다. TV 방송용 카메라 렌즈에는, NTSC 방식과 HDTV 방식을 양립시키기 위한 화면 크기를 취급하며, 100배 가까운 줌 배율을 갖는 줌 렌즈가 사용되고 있다.

(4) 성능 평가

현미경 대물 렌즈, 광 디스크 렌즈와 같이 수차가 적은 렌즈 평가에는 회절을 고려한 계산이 필요하며, 이후 강도 분포 또는 OTF를 구하는데, 반면에 사진 렌즈와 같이 수차가 많은 렌즈는 광선 수차로 구한 스폿 다이어그램으로부터 강도 분포 또는 OTF를 구한다. 현재는 수차의 크기를 구분하여 사용하고 있는데, 이러한 크기와 무관한 소프트웨어가 필요하다. 물리 광학적인 시뮬레이션을 목적으로 한 소프트웨어도 있고, 다양한 광학 실험 배치에 따른 파면 평가나 광학 연마면의 굴곡 등을 간접 무늬로 평가할 수도 있다. 리소그래피 기술로 조명광 간섭도의 변화나 위상 변이 마스크를 사용할 때 성능 평가가 가능한 예도 있다. 렌즈 자체의 평가는 스칼라(scalar) 회절에 의한 방법으로 행할 수도 있으나, 실제 사용 상태, 예를 들면 트랙 피치, 재생 신호 마크, 마스크 선폴이 파장 정도이거나 그 이하가 되면, 시뮬레이션은 스칼라 회절 이론을 대신하는 고정 밀도의 벡터 회절 이론이 필요하게 된다.

(5) 회절 광학 소자의 채택

회절을 이용하는 광학 소자로서 결상 작용을 갖기 때문에 회절 렌즈라고도 한다. 장파장이며 회절각이 크므로, 렌즈와 같이 요철 렌즈가 아니라 볼록 렌즈만으로도 물색 설계가 가능하다는 특징이 있다. 단일층의 회절 광학 소자에서



는 촬영에 불필요한 플레어가 발생하는 문제가 있어, 2개의 회절 격자를 수 마이크로의 정밀도로 접근시키는 적층 구조로 해결한 예가 있다. 이상 부분 분산 유리나 비구면 광학 특성을 상회하여 광학 산업 세계에 새로운 변혁을 초래할 가능성을 안고 있는 광학 소자로서 기대를 모으고 있다.

(6) 조명 해석

조명 광학계의 평가에서는 광 투과 물체 내에서의 광 선속(光線束)의 움직임이 해석되어 효율적인 설계가 가능하게 되었다. 적용되는 구조는 라이트파이프 모양이나 복잡한 삼차원 구조일 수도 있고, CAD/CAM에서 생성된 구조 데이터를 그대로 입력할 수도 있다.

3) 기구 설계

가정용 비디오 카메라의 줌 렌즈에서는 리어 포커스와 촬상 오토 포커스에 의해 앞군 렌즈가 움직이지 않고, 전자 제어에 의해 종전의 기계 캠이 폐지됨에 따라 줌 보정 기능과 초점 조정 기능이 융합되었다.

오토 포커스 등에는 액추에이터가 사용되는데, 줌 렌즈를 영상 계측에 사용할 경우, 지정 배율로 하거나 초점 거리로 해야 하며, 렌즈 이동량 감지 기능, 엔코더, 제어 유닛이 필요하다.

일반적으로 렌즈계로서 경통에 렌즈를 조립함으로써 제작되는데, 이 때의 편심 공차를 포함하여 공차를 렌즈 성능으로 결정해 간다. 광학 제품의 생산성 향상을 위하여 제조 공정을 계산기 내에 구축하고, 설계 단계에서 양산시의 광학 성능, 양산성 및 공차 감도를 정량 평가할 수 있는 시뮬레이션으로 가상 양산 테스트 시스템을 구성하여 발생하는 문제를 설계시 정량 평가한다. 경통 광학 제품에서의 통계적 공차 설계 시스템이 사용되고 있으며, 품질 공학의 허용차 설계를 사용하여 생산을 고려한 공차 해석 등도 앞으로 더욱 발전되어 갈 것이다.

4) 성능 평가

렌즈의 성능을 고정밀도로 평가하는 수단으로서 파면을 이용한다.

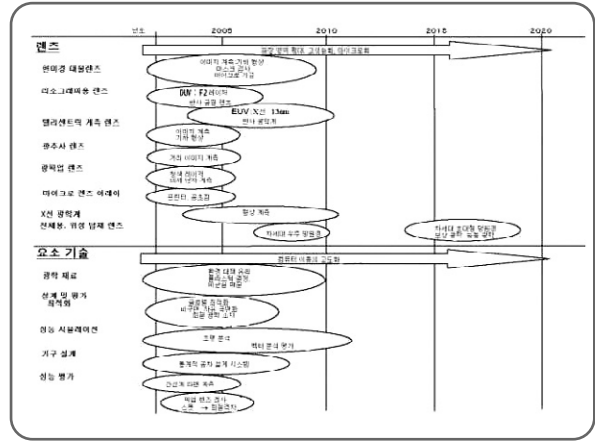


그림1. 로드맵 : 계측용 렌즈

(1) 간섭 계측

간섭계에 의한 파면 계측이 렌즈 성능 향상에 큰 기여를 해 왔음은 논할 여지도 없다. 이는 간섭계로 구한 파면 오차와, 렌즈 데이터로 계산되는 광 경로차로 나타나는 파면은 동일하게 취급할 수 있으며, 공통되는 입장에서 그 다음의 강도 분포나 OTF를 구할 수 있다. 따라서, 설계 평가와 성능 평가가 일대일 대응 관계로 될 수 있다. 간섭계에서 참조면을 얻는 방법으로 피조 타입이 많이 사용되고 있는데, 트와이만 그린 타입도 사용한다. 파장은 He-Ne 레이저에 의해 많이 해석되는데, 자외선 영역의 단파장에 대해서는 그 파장에서의 평가가 필요할 것이다.

픽업 렌즈, 특히 DVD 광 헤드의 경우, 파면 수차의 rms를 수 10nm로 제한하지 않으면 필요로 하는 특성이 얻어지지 않으므로 렌즈에 엄격한 사양이 요구되어 간섭계로 측정되게 되는데, 참조구가 불이 필요하여 조정에 시간이 오래 걸리게 된다. 생산 라인에서의 검사에 스폿 방법이 실용화되어 있기는 하나, 정밀도 및 고속화에 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하는 수단으로 참조 구를 필요로 하지 않는 반사형 위상 회절 격자를 사용한 각 공유 (angular sharing) 간섭을 이용한 방법이 개발되었다.

(2) 샤크 · 하트만 방식에 의한 파면 계측

파면 측정 장치로 알려져 있는 샤크 하트만법은 CCD와 조합하여 마이크로 렌즈 어레이의 각 요소 렌즈에 입사되는 파면 경사를 초점면에서 집광점의 위치 어긋남에 의해 읽어내는 것이다. 간섭계와 같이 참조면을 필요로 하지 않

아 이용 가치가 높다. 천체 망원경에 대한 응용으로, 파면을 계측하여 미리 형상을 바꾸는 보상 광학계의 센서로 사용되고 있다. 또한, 안구 전체의 광학적 수차 측정에도 이용되고 있다. 앞으로 보다 많이 이용될 것이다.

#### 4. 결론

계측용 렌즈 자체는 계측 기술이 아니므로 계측 기술의 로드맵에는 맞지 않는 주제일지도 모르나, 대상으로 삼고 있는 계측에서 고도의 이용이 예상되며 그에 중요한 역할을 하고 있어 여기서 채택하였다. 향후 널리 될 것으로 기대된다.

#### <참고 문헌>

- 1) 쓰치다 히로부미 외: "결상 소자 및 광학 시스템", 광학 31(2002), 210
- 2) 나카무라 오사무 외: "광 응용 계측", 광학 31(2002), 233
- 3) 오노 아키라 외: "반도체 노광 마스크 검사용 심자외선 광학계", 광 기술 컨택트 40(2002), 565
- 4) 야바시 아키라 외: "비접촉 3차원 형상 입력 시스템 "VIVID700"의 개발" 98 광 계측 심포지엄 논문집 59
- 4) 오이카와 다다마사: "DWDM과 이에 이용되는 마이크로 렌즈 기술", 광 기술 컨택트 40(2002), 337
- 6) 요시미 노부 외: "국제 반도체 기술 로드맵(ITRS2001) 보고", 응용 물리 71(2002), 1241
- 7) 시부야 마사토: "광 리소그래피 인쇄", 광학 31(2002), 274
- 8) 이에 마사노리: "천문 광학", 광학 31(2002), 290
- 9) 아오키 사다오: "X선 결상 광학", 광학 31(2002), 214
- 10) 오노 아키라 외: "반도체 노광 마스크 검사용 심자외선 광학계", 광 기술 컨택트 40(2002), 565
- 11) 오노자와 마사히로: "환경 대책 유리", 제23회 광학 심포지엄 (2001) 예고집 35
- 12) 우에하라 스스무: "몰딩 프레스용 저 Tg 광학 유리", 광기술 컨택트 40(2002), 635
- 13) 도기노 고키치 외: "편심 자유 곡면 프리즘을 이용한 FMD 광학계의 개발", 광 설계 연구 그룹 기관지 No.16(1998), 50
- 14) 특집 "광학 해석 소프트웨어", 광기술 컨택트 38(2000), 3
- 15) 오타키 카쓰라: "벡터 결상 시뮬레이션", 광설계 연구 그룹 기관지 No24(2001), 47
- 16) 하야미즈 다카야스: "광학 설계 다양화의 20세기와 21세기에 대한 기대", 광기술 콘택트 39(2001), 53
- 17) 나카이 다케히코 외: "적층형 회절 광학 소자의 연구와 카메라 렌즈에의 응용", 광기술 콘택트39(2001), 540
- 18) 무라타 아키코 외: "액정 가변 초점 렌즈의 결상 광학계에의 응용", 광설계 연구 그룹 기관지 No26(2002), 16
- 19) 오자와 사토시: "SIDM에 의한 초소형 광학 줌 유닛", 광설계 연구 그룹 기관지 No26(2002), 16
- 20) 다카다 가즈마사 외: "회절 격자를 사용한 구면파 앵글러 쉐어 링법에 의한 DVD 픽업 렌즈 검사", 정밀 공학회지 67(2001), 1808