

레이저 기입 광학계용 광학 장치의 계측

레이저 프린터나 디지털 복합기(MFP:MultiFunction Peripheral)에 탑재되는 레이저 기입 광학계에는 주사 광학 소자($f\theta$ 렌즈, $f\theta$ 미러)나 폴리곤 스캐너라는 광학 장치가 사용되고 있다. 본 고에서는 레이저 기입 광학계에 사용되는 광학 장치를 중심으로, 이들을 대상으로 하는 최근의 계측 기술을 설명하면서 2020년을 향한 향후의 전망에 대하여 설명하기로 한다.

편집자 주

1. 레이저 기입 광학계의 기본 구성

레이저 기입 광학계의 기본 구성을 그림 1에 나타내었다. 반도체 레이저에서 방사되는 레이저광을 고속 회전하는 폴리곤 스캐너로 편향 주사한다. 폴리곤 스캐너와 감광체 사이에 주사 광학 소자(그림 1(a)은 $f\theta$ 렌즈계, 그림 1(b)은 $f\theta$ 미러계를 각각 나타냄)를 배치하고, 수 $10\mu\text{m}$ 직경의 광 스폿에 모아서 감광체 상에 결상시킨다. 반도체 레이저를 ON/OFF 제어함으로써 감광체면 상에 정전기적인 2차원 영상 정보, 즉 정전 잠상을 형성한다. 정전 잠상에 토너를 부착시키고, 토너를 일반 종이에 전사 및 정착시킴으로써 인쇄가 완성된다.

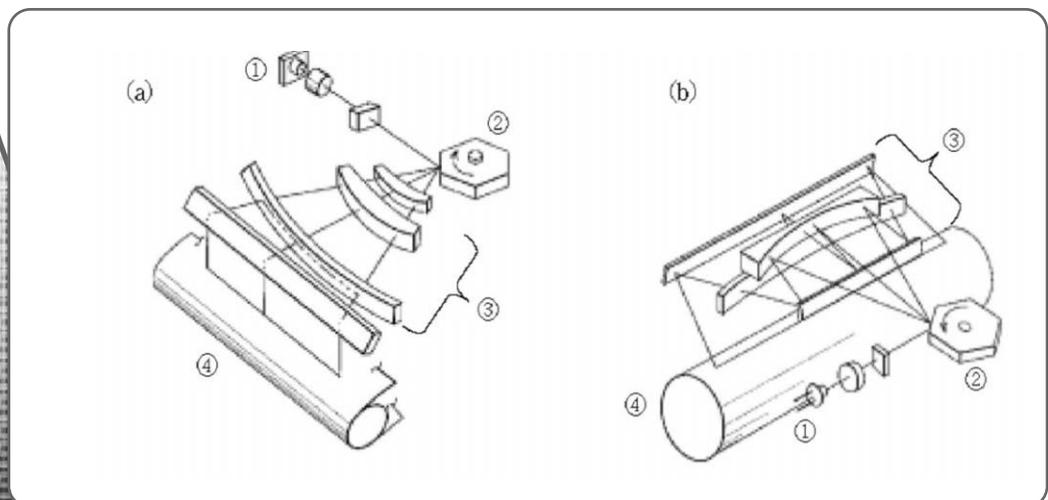


그림 1. 레이저 기입 광학계의 기초 구성 - ① 반도체 레이저, ② 폴리곤 스캐너, ③ 주사 광학 소자, ④ 감광체

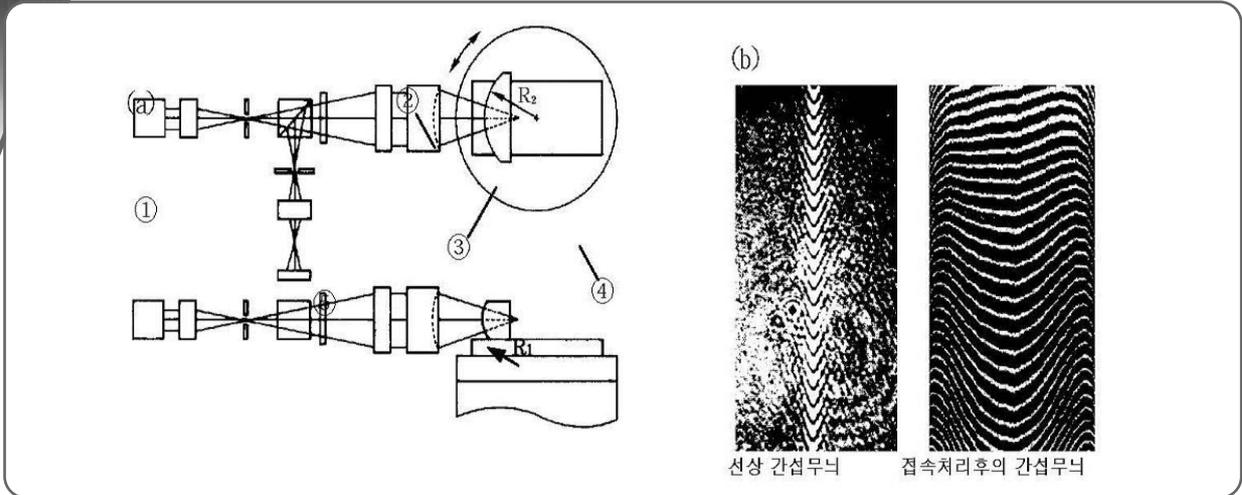


그림2. 도넛형 트로이달면의 간섭 계측 장치와 측정예²⁾

2. 광학 장치의 계측

(1) 자유 곡면 광학 소자의 형상 계측

1975년에 등장한 최초의 레이저 프린터 IBM-3800 이래 주사 광학 소자의 광학면에는 레이저 주사 방향(주주사 방향)과 직교 방향(부주사 방향)으로 각각의 곡률이 다른 면, 이른바 아나모픽면이 자주 사용되어 왔다¹⁾. 한편, 형상 계측 기술의 경우, 도넛 형상의 토로이달면이나 원통형의 토로이달면에 구면파를 조사하면 선 형상의 간섭 무늬가 얻어지는 것을 이용하여, 선 형상 간섭 무늬의 접속 처리와 푸리에 변환법을 조합시킨 신규 간섭 계측 기술이 제안되었다²⁾. 그림 2(a)에 도넛 형상의 트로이달면의 간섭 계측 장치의 구성을, 그림 2(b)에 측정예를 나타내었다.

최근들어 주사 광학 소자에는 자유 곡면이 종종 사용되게 되었다. 가장 큰 이유는, 레이저 기입 광학계의 구조상 특수성에 있다.

레이저 기입 광학계에서는 주사 광학 소자의 가늘고 긴 개구 중에서 일부에 레이저빔이 입사되고, 감광체 상에 스폿 결상된다. 즉, 감광체 상의 특정한 결상 위치와 주사 광학 소자면의 특정한 위치가 거의 일대일로 대응한

다. 이 경우, 각 결상 위치마다 최고의 광학적 성능이 얻어지도록 하기 위하여 주사 광학 소자의 부분 형상을 최적화시키고, 전체적으로 하나의 매끄러운 면을 구성하는 광학 설계가 가능해지며, 최적의 해로서 자유 곡면이 얻어진다. 최근에는, 여러 개의 빔으로 동시 기입을 행하는 멀티 빔 광학계에서 각각의 레이저 광속에 대하여 최적의 수차 보정을 행하기 위하여 자유 곡면을 사용한 예가 보고되어 있다³⁾.

자유 곡면 광학 소자의 형상 정밀도는 수10mm 오더의 비교적 긴 공간 파장 성분에 대하여 $\pm 1\mu\text{m}$ 정도가 수mm 오더의 짧은 공간 파장 성분에 대하여 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 정도가 요구된다. 따라서, 이들을 평가하기 위한 측정 장치의 정밀도로는 최저 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 이하가 되어야 하며, 가능하면 $\pm 0.01\mu\text{m}$ 을 보장할 수 있어야 한다. 자유 곡면의 형상 계측 방법으로는 현재 점 계측 방법에 의한 직교 좌표 측정이 주류를 이루며, 크게 광 탐침법과 탐침법의 2가지로 나뉜다.

광 탐침법은 렌즈에서 수 μm 로 좁힌 광을 사용하여 표면 위치를 센싱하는 방법이며, 비점 수차법으로 대표되는 각종 초점 검출법, 삼각 측량법, 광파 간섭을 이용하는 방법⁴⁾ 등 여러가지 방식이 제안되었다. 탐침법에 비해 응답성이 높으며, 표면을 손상시키지 않는다는 장점이 있으나, 반면, 경사면에 대한 성능 유지가 어려우며, 구체적으로 설명하면 급한 경사면에 대해 S/N이 저하되거나 광학계의 수차에 기인하는 계통 오차가 커진다는 단점이 있다. 초점 검출 원리를 기초한 광 탐침법에서 경사 각도 $\pm 30\text{deg}$ 범위에서 측정 정밀도 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 을 달성한 예가 보

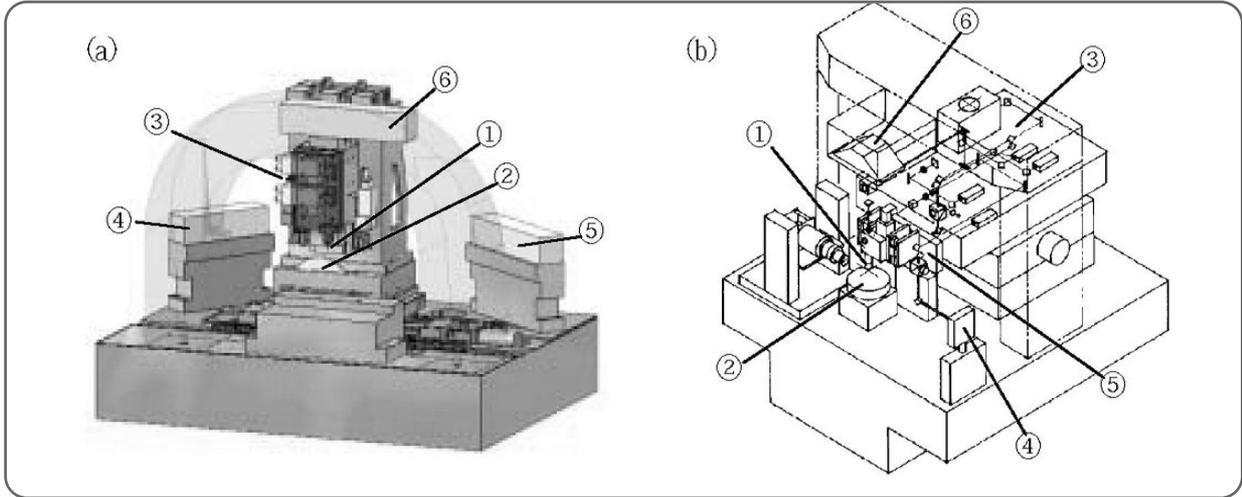


그림 3. 촉침법에 의한 3차원 형상 측정 장치 - ① 촉침(프로브), ② 피촉정물, ③ 레이저 측정 광학계, ④ ⑤ ⑥ 기준 미러

고된 바 있다⁹⁾.

탐침법은 프로브에 의한 접촉 주사로 표면 위치를 센싱하는 방법이며, 특히, 자유 곡면 형상 계측에 적용되는 경우⁶⁻⁹⁾에는 표면의 손상을 방지하기 위하여 직경이 수mm 정도인 비교적 큰 크기의 구를 프로브로 사용하는 경우가 많다. 좌표 측정에는 일반적으로 레이저 간섭 측정을 이용할 수 있다. 좌표 측정의 기준이 되는 참조 평면 미러를 계측 장치(metrology) 프레임 상에 배치하고, 공기 흔들림을 피하기 위하여 측정 광 경로를 진공으로 하며, 총 불확도 $\pm 19.5\text{nm}(k=2)$ 를 달성한 예⁷⁾나, XYZ 모든 축에 대해 아베 원리를 만족하는 측정 광학계 배치를 실현함으로써 $\pm 3.7\text{nm}(\sigma)$ 의 재현성을 실현한 예⁸⁾ (그림 3(a))가 보고된 바 있으며, 범용 측정기로서 이미 시판되고 있다⁶⁾ (그림 3(b)).

점 계측 방법에 의한 직교 좌표 측정으로 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 이하의 측정 정밀도를 보장하기 위해서는, 좌표축 직각도를 μrad 오더로 교정해야 한다. 곡률 반경의 절대값이 동일한 2개의 요철 기준공의 측정 데이터를 사용하여, X축과 Y축 사이의 직각도 오차를 제외한 2개의 좌표축 직각도와 프로브 볼이 구형도를 동시에 추정하는 방법¹⁰⁾이나, 한 개의 교정용 기준볼의 측정 데이터를 사용하여 프로브 볼이 구형이라는 가정 하에 3개의 좌표축 직각도를 추정하는 방법(일본 특허 공개 2000-74662)이 제안되었다.

측정 대상이 렌즈인 경우에는 입사면과 사출면이 각각 단독인 면 형상뿐만 아니라, 서로 상대적인 위치 관계, 즉 편

심도 소정의 정밀도를 확보해야 한다. 각각의 면을 측정하여, 계산기 처리로 좌표 변화를 행하여 편심을 추정하는 방법(일본 특허 공개 2002-214071)이나 입사면측과 사출면측의 각각의 프로브를 배합하여 두 면을 동시 측정하여 편심을 구하는 방법¹¹⁾이 제안되었다.

(2) 회절 광학 소자의 형상 계측

회절 광학 소자는 광의 회절 현상을 이용한 소자로, DVD 플레이어의 광학계를 비롯하여 카메라용 촬상 광학계나 레이저 프린터의 기입 광학계에도 사용되게 되었다. 분산이 마이너스값을 취하는 특성, 즉 역분산 특성을 이용하여 굴절 광학 소자와 병용함으로써 색 수차를 보정할 수 있다는 점이 특징인데, 단일 파장을 사용하는 기입 광학계에 응용할 경우의 장점으로는, 수차 보정을 위하여 비구면 작용을 부여할 수 있다는 점과 생산성 향상을 위하여 광학 소자의 거시적 형상의 두께를 균일화할 수 있다는 점을 들 수 있다.

형상 계측에는 광 탐침법¹²⁾이나 탐침법에 의한 점 계측 방법, 현미 간섭에 의한 면 계측 방법 등이 적용된다. 표면 릴리프형의 회절 광학 소자에서는, 그 표면에 사용 파장의 약 2배의 높이를 갖는 계단 형상 또는 거치 형상이 배열된다. 광원에 간섭 광원을 사용할 경우, $\lambda/2$ 이상의 위상 차이가 있으면 래핑 해제(unwrapping) 처리를 할 수 없게 되므로, 회절 광학 소자의 계측에는 저간섭 광원을 사용한

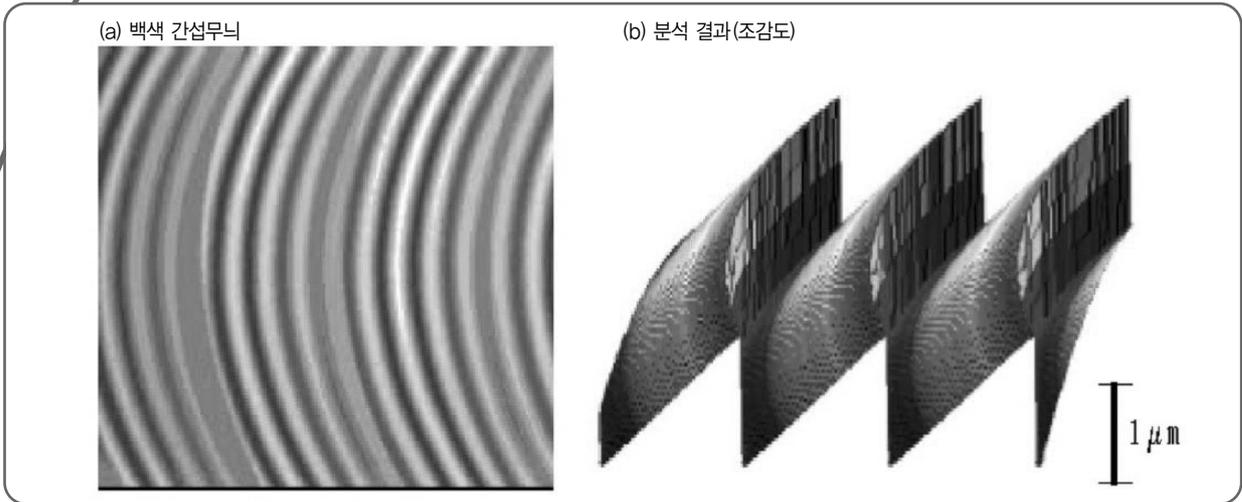


그림 4. 색 현미 간섭계¹³⁾에 의한 회절 렌즈 측정에

현미 간섭법이 적합하다. 그림 4에 시판되는 백색 현미 간섭계¹³⁾를 사용한 레이저 기입 광학계용 회절 렌즈의 측정 예를 나타낸다.

(3) 내부 계측

렌즈와 같이 광이 내부를 투과하는 광학 소자의 경우에는 표면 형상뿐만 아니라, 굴절률의 동일성(균일성)이나 복굴절 등의 내부 품질도 광학 성능에 영향을 끼친다. 특히 플라스틱제의 광학 소자일 경우, 유리에 비해 내부 균질성을 확보하기가 어렵다.

플라스틱 사출 성형에서는 수지가 금형 내에 고압 충전되면 금형과 접한 외측 부분에서 가장 열이 쉽게 발산되어 먼저 고착화되고, 광학 소자의 내부에서 마지막으로 고착화된다. 광학 소자의 외측은 고압 하에서 고착화되기 때문에 굴절률이 높으며, 반면 내부는 열 수축이 진행되어 압력이 저하된 상태에서 고착화되기 때문에 굴절률이 낮아진다. 렌즈 광축 방향의 평균 굴절률로 비교하면, 렌즈 개구의 외주부와 중앙부의 굴절률 차이는 10⁻⁴ 오더에 지나지 않으나, 그럼에도 불구하고 굴절률 차이가 마이너스 파워(오목렌즈의 효과)를 발생시켜 광학 성능에 악영향을 끼치는 경우가 있다. 또한, 냉각 속도에 따라라도 내부 품질

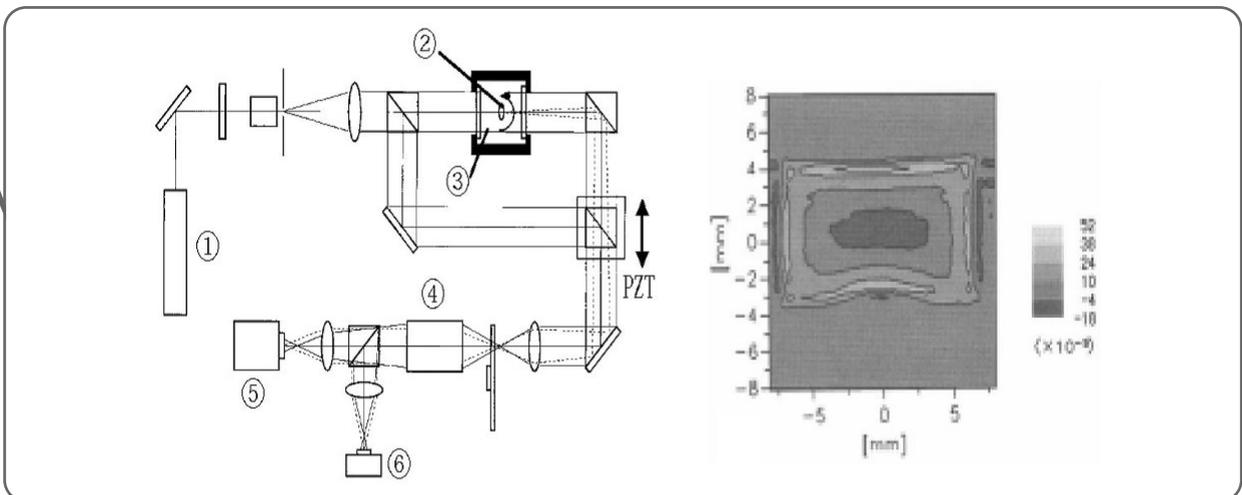


그림 5. CT법에 의한 3차원 굴절률 측정 장치 및 측정예¹⁴⁾ - ① He-Ne 레이저, ② 피축정물, ③ 매칭액, ④ 줌 렌즈, ⑤ 1-D CCD, ⑥ 2-D CCD



이 좌우되며, 냉각 속도를 빠르게 하면 내부 변형이 잔류 되기가 쉽다. 잔류 변형은 복굴절을 증가시켜 빔 집광 성능을 방해한다.

굴절률의 계측 방법으로는 X선 CT (Computed Tomography)의 해석 기법을 마하젠더(Mach Zender)형 레이저 간섭계에 적용하여, 매칭액에 담긴 렌즈 내부의 삼차원적인 굴절률 분포를 10⁻⁵오더의 정밀도로 비파괴 계측하는 방법¹⁴⁾이 제안되었다. 그림 5에 장치 구성 및 측정예를 나타내었다.

복굴절 계측에 관해서는 지금까지 몇 가지 방식이 제안되었으나^{15, 16)}, 주사 렌즈로의 적용을 시도한 예로는, 렌즈 파위를 보상하는 조명 광학계 및 영역 분할 측정의 적용에 의해 긴 형태의 렌즈의 복굴절 위상차를 5.8nm의 정밀도로 계측한 예가 보고되어 있다¹⁷⁾. 그림 6에 장치 구성 및 측정예를 나타내었다.

(4) 폴리곤 스캐너 계측

폴리곤 스캐너와 관련된 계측으로는 지터(zitter) 계측, 폴리곤 미러의 정적 및 동적인 축 경사 계측, 폴리곤 미러의 평면도 계측 등이 있다. 이들 모두 기술적으로는 거의 확립된 상태이며 현재로서는 큰 과제가 없으나, 앞으로 고속 인쇄의 요구가 증가되면 원심력에 의한 변형이나 모터의 발열에 따른 열적 변형을 평가하기 위한 폴리곤 미러 동적 계측에 대한 필요성이 증가될 것으로 예상된다.

(5) 등배 결상 소자 계측

고속 인쇄 요구를 배경으로 어레이 상 광원과 등배 결상 소자를 사용하여 발광 점의 정입상을 감광체 상에 결상하는 방식, 소위 고체 주사 기입 방식이 제안된 바 있다. 어레이 상 광학 소자의 형상을 하나 하나 계측하는 방식은 광학면의 수가 많아 현실적으로 부적합하기 때문에, 빔 스폿 직경이나 빔 스폿 위치 등 광원과 조합시킨 유닛 전반에서의 광학 특성 평가가 주류를 이룬다.

3. 레이저 기입 광학 장치의 계측 기술 로드맵

레이저 프린터나 MFP의 고화질화를 위하여 레이저 기입 광학 장치에는 고성능화가 더 요구됨과 동시에, 계측 기술의 새로운 발전이 예상된다. 레이저 기입 광학 장치를 대상으로 한 2020년까지의 계측 기술에 관한 로드맵을 표 1에 나타내었다.

(1) 레이저 기입 방식

레이저 기입 방식의 경우, 폴리곤 스캐너를 사용하는 일반적인 편향 주사 방식과 어레이 광원 및 등배 결상 소자를 사용한 고체 주사 방식이 어느 정도 세그먼트를 나누면서 당분간은 공존할 것으로 예상된다. 비용을 억제하면서 고속, 고화질, 저소비 전력 등이 상품 개발시 당면한 키워드

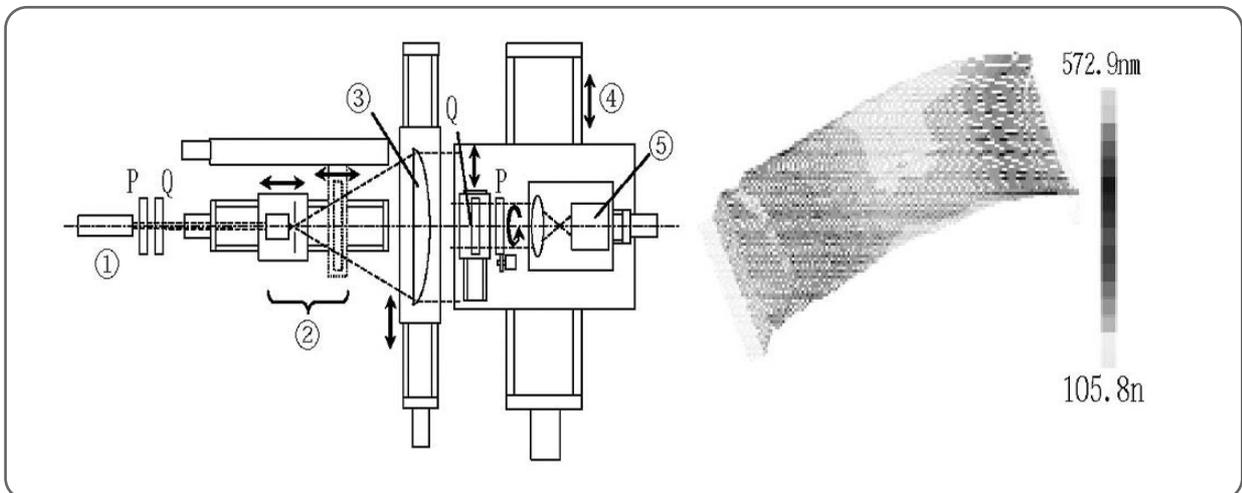


그림 6. 주사 렌즈 복굴절 측정장치 및 측정예¹⁷⁾ - ① 반도체 레이저, ② 렌즈 파위 보상 광학계, ③ 피측정물, ④ 영역 분할 측정용 스테이지, ⑤ CCD 카메라, P:편광판, Q:1/4 파장판

옵토 메카트로닉스 계측 기술 로드맵 II

가 될 것이며, 멀티 빔 노광 기술, 폴리곤 스캐너 고속화 기술, 고해상화를 위한 도트 소경화 기술 등이 향후 발전해 갈 것으로 생각된다. 또한 2020년을 향해 획기적인 발전을 이룰 수 있는 테크놀로지로서, 포토닉스 결정을 이용한 다양한 기능 장치, 예를 들면 저임계값 레이저, 도파로, 결상 렌즈 기능 소자, 또한 이들을 일체로 통합한 신규 광 기입 유닛의 구현화가 기대된다.

(2) 자유 곡면 광학 소자

레이저 프린터나 MFP의 고해상화를 위하여 자유 곡면 광학 소자에 요구되는 형상 정밀도가 향후 더욱 강화될 것으로 예상된다. 광학 소자를 플라스틱 성형으로 가공하기 위한 급형 평가까지 고려한다면, 45deg의 급경사를 포함하는 1000mm² 정도의 표면 형상을 일반 환경에서 측정 정밀도 10nm로 계측할 수 있을 것이 하나의 목표가 될 것이다. 레이저 간섭 측정을 이용하는 점 계측 방법에서는, 공기 산란에 의한 굴절률 변화를 실시간으로 보상하는 기술, 계측 시간 중 드리프트 오차를 최소한으로 억제하기 위한 고속화 기술이 열쇠가 될 것이다. 또한, 임의 파면의 간섭 생성이 가능해지면, 간섭 무늬 해석에 의한 자유 곡면 계측에도 새로운 길이 열릴 것이다. 예를 들면 계산기 파워 향상 및 미세 가공 기술 향상을 생각하면, 계산기 홀로그래프 기술의 실용적 발전을 기대할 수 있다.

렌즈 굴절률 계측의 현재 상황은 250장의 투과 파면 데이터로부터 굴절률의 삼차원 분포를 재구성하는 데에도 측정 시간과 해석 처리 시간을 합하면 10수분이 필요한데, 측정 시간을 단축하는 것이 당면 과제가 될 것이다. 또한, 굴절률 분포형 렌즈의 굴절률 분포 계측 기술이나 복굴절의 삼차원 분포 계측 등 새로운 계측 요구에 대한 기술 발전도 예상된다.

(3) 회절 광학 소자

입체적인 거시적 형상을 갖는 자유

곡면 광학 소자에 비하여 동일한 광학적 기능을 평면으로 접어 넣을 수 있는 회절 광학 소자는 생산성 면에서 큰 장점이 될 수 있다. 거시적 형상이 평면에 가까운 회절 광학 소자에 대해서는 1mm² 정도의 미세 영역으로 한정된 계측 기술이 거의 확립된 상태이며, 앞으로는 정밀도를 유지하면서 측정 영역을 어떻게 확대할 것인지가 과제가 될 것이다. 구체적으로는, 현미 간섭법에서의 보다 고안정 및 고정밀도의 스티칭 처리 기술의 발전이나 빠른 프로브와 nN 차수의 측정력 제어에 의한 SPM의 발전형으로서의 광역 미세 패턴 계측 기술의 발전이 예상된다. 1000mm² 정도의 입체 표면에 새겨진 미세 패턴을 1nm의 정밀도로 계측할 수 있을 것이 최종 목표가 될 것이다.

(4) 폴리곤 스캐너

고속 인쇄 요구가 증가됨에 따라 폴리곤 스캐너의 회전수가 50,000rpm 이상이 되면, 원심력이나 모터의 발열에 의한 폴리곤 미러의 변형을 무시할 수 없게 되며, 고속 운동체를 대상으로 하는 표면 형상 계측 기술의 필요성이 증가될 것이다. 예를 들면, 100,000rpm으로 회전하는 폴리곤 미러 평면도를 간섭 무늬 영상으로 얻을 경우, 비주기 운동 성분 에 기인하는 오차를 피하기 위해서는 적산 처리 없이 100ps 이하의 순간 간섭 무늬 영상을 기록하는 기술이 필요하다.

(5) 등배 결상 소자

현재로서는 광원과 조합시킨 유닛 전체로서의 광학 특성 평가가 현실적인 방법이기도 하여 주류를 이루고 있으나, 향후 소자에 대한 요구 정밀도가 높아지면, 어레이 형상으로 다수 배열된 광학 소자나 이를 제작하기 위한 금형의 형상을 각각 측정해야 한다. 어레이 형상으로 1000개 배열된 결상 광학 소자의 표면 형상을 모두 측정하는 경우를 가정해 보면, 1개당 0.1초 정도로 측정을 완료하는 것이 바람직하고, 고속 자동 얼라인먼트를 실현하기 위한 계측 제어 기술의 개발이 그 열쇠가 될 것이다.

레이저 기입 광학계용 광학 장치와 관련된 최근의 계측 기술에 대하여 개략적으로 설명하였으며, 향후 필요해질 장치 계측 기술에 대한 예측을 설명하였다. 어디까지나 전자 사진 기술에서의 레이저 기입 장치를 전제로 하였으므로, 여기서 설명한 미래 예측의 대부분은 현재로서는 계측 기술의 연장선에 불과하다는 느낌은 부인할 수 없으나, 앞으

**<참고 문헌>**

- 1) 사쿠마 : 비구면 광학 소자의 동향, 1995년도 연마용 입자 가공 학회 학술 강연 논문집, pp.91-96(1995)
- 2) H. Sahara : Development of the Toroidal Surface Measurement System, SPIE Vol. 1531 Advanced Optical Manufacturing and Testing II, pp.72-79(1991)
- 3) 이나가키 : 다항식 자유 곡면 미러를 사용한 멀티 빔 주사 광학 계의 설계, 제25회 광학 심포지엄 예고집, pp.5-8(2000)
- 4) 요시즈미 : 초고정밀도 삼차원 측정기, 광기술 콘택트, 27, 5, pp.266-270(1989)
- 5) 이세키 : 레이저 주사 광학 소자의 형상 측정 · 평가 기술, Ricoh Tech. Rept. 23, pp.74-77(1997)
- 6) 요시즈미 : 원자간 힘 프로브 탑재 초고정밀도 삼차원 측정기, National Tech. Rept. 39, 5, pp.116-121(1993)
- 7) 후쿠토미 : 좌표 측정기에 의한 형상 계측의 고정밀도화, 광기술 콘택트, 37, 8, pp.565-571(1999)
- 8) M. Negishi : A High-Precision Coordinate Measurement Machine for Aspherical Optics, Proc. 9th-ICPE Japan, pp.354-359(1999)
- 9) 이세키 : 고정밀도 삼차원 측정기의 개발, 2002년도 정밀 공학회 춘계 대회 강연 논문집, M03, p. 575(2002)
- 10) 요시즈미 : 초고정밀도 삼차원 측정기의 정밀도 교정법, 광학, 20, 10, pp.687-695(1991)
- 11) 네기시 : 고정밀도 자유 곡면 형상 측정 장치의 개발(제3보), 2002년도 정밀 공학회 추계 대회 강연 논문집, M05, p.542(2002)
- 12) 미우라 : 레이저 프로브에 의한 형상 계측, 광기술 콘택트, 37, 8, pp.525-532(1999)
- 13) 나카무라 : 비접촉 3차원 표면 성질과 상태 측정기, 광 얼라이언스, No. 7, pp.24-28(2002)
- 14) H. Sahara : Interferometric Measurement of the Refractive-Index Distribution in Plastic Lenses by use of Computed Tomography, Appl. Opt. 41, 25, pp. 5317-5325(2002)
- 15) 오타니 : 위상 시프트법에 의한 2차원 복굴절 분포 측정, 광학, 21, 10, pp.682-687(1992)
- 16) 노구치 : 복굴절 공간 분포 측정법, 광기술 콘택트, 31, 5, pp.241-246(1993)
- 17) 모리타 : 주사 렌즈 복굴절 측정 장치의 개발, Ricoh Tech. Rept. 26, pp.115-120(2000)
- 18) 이나가키 : 광학식 사무기기(2) 레이저 프린터, OPTRONICS, No.7, pp.233-239(2002)

로 포토닉스 결정 응용 장치를 대표하는 혁신적 기능 장치가 개발될 것이며, 그로 인해 계측 기술도 비약적 진보를 이룰 것을 기대하는 바이다.

5. 광 간섭 계측**5.1. 머릿말**

일반적으로 광 간섭 계측은 비접촉, 고감도, 면계측, 내전자(耐電磁) 노이즈 등 다른 계측 방법에는 보이지 않는 우수한 장점을 가지고 있는 반면, 공기 흔들림이나 외부 진동 등의 외란에 약하여 광학 조정이 번거로우며 측정 범위가 좁다는 문제점도 있어, 아직까지는 산업적으로 충분히 보급되고 있지 않은 것이 현실이다. 여기서는 오토 메카트로닉스 기술로서의 광 간섭 계측 기술이 상기 문제점을 극복하면서, 앞으로 어떻게 발전해 나갈 것인지를 예측하여 기술 로드맵의 작성을 시도하였다. 기술 로드맵은 반도체

산업에서는 본격적인 것으로 정평이 나 있지만, 광 간섭 계측 기술에 대한 것은 거의 없다. 따라서, 여기서 채택한 기술과 그 미래에 대해서는 필자의 경험과 주관이 상당히 많이 개입되어 있음을 미리 말해 둔다.

5.2. 광 간섭계 로드맵

여기서는 오토 메카트로닉스 기술로서 중요하다고 여겨지는 간섭 계측 기술 로드맵을 계측 대상 종류별로 I 평면 계측, II 비구면 계측, III 자외 광학 부품 계측, IV 동적 계측 4종류를 작성하기로 하였다.

① 평면 계측

평면 계측, 즉 평면 거울의 표면 형상 계측은 종래로부터 간섭 계측에서 가장 기본적으로 중요하며, 그 중요도는 앞으로 변함이 없을 것이다. 대상으로는 각종 평면 반사경(광 경로 변경, 빔 스플리터, 레이저 공진기 미러 등), 오퍼컬 플랫 등의 표준을 들 수 있고, 응용으로는 반도체 산업에서의 실리콘 웨이퍼를 들 수 있다. 웨이퍼에서는 반도체

옵토 메카트로닉스 계측 기술 로드맵 II

산업의 로드맵에도 기재되어 있는 바와 같이¹⁾ 앞으로 그 직경이 커지는 경향이 있으며, 그 평면도를 간섭 계측하는 기술은 앞으로도 중요한 부분이 될 것이다. 반도체 로드맵에서는 2013년까지 300mm ϕ 가 되고, 2016년에 450mm가 되어 앞으로 더욱 커질 것으로 예상된다. 계측 정밀도는 웨이퍼 상으로의 축소 노광의 초점 심도가 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 인 점에 근거하여²⁾, 0.5 $\mu\text{m/p}$ -v보다 높은 정밀도가 필요해질 것이다. 이는 웨이퍼 면적이 커지더라도 바뀌지 않을 것이다. 최적의 정밀도는 어느 정도 큰(예를 들면 100mm ϕ) 평면을 구성하고 있는 분자 또는 원자 한 개 분량이 되는데, 대략 그 정도로 계측되면, 현재로서는 AFM이나 STM 등의 차분 주사 프로브 현미경의 수비 범위가 된다. 현재 일반적인 평면계 측정용 간섭계로서 피조형이 널리 사용되고 있으며, PZT 등의 참조면을 파장의 몇 분의 1을 기계적으로 이동

시킴으로써 계측 정밀도를 높이는 무늬 주사 기구가 장착된 고정밀도 간섭 시스템이 세계 각국에서 시판되고 있다³⁾.

그러나, 피조 간섭계에서는 계측 대상의 면적이 커지면 참조면도 커져야 되고, 그 중량도 반드시 무거워지게 된다. 그러면 PZT에 의한 참조 거울의 주사가 어려워지고, 그렇게 되면 광원의 파장을 주사하는 간섭계가 필요해진다. 이러한 배경에서 최근에는 파장 주사형 피조 간섭계가 시판되고 있으나, 기계적인 파장 주사를 하지 않고 파장 주사 범위를 크게 하는 등의 과제가 남아 있다. 450mm ϕ 이상이 되면, 다른 원리를 가진 새로운 간섭계가 출현될 것이다. 측정 면적이 과도하게 커지면 간섭계를 구성하는 광학 부품인 참조면이나 콜리메이트 렌즈가 너무 커져 피조형으로는 대응할 수 없게 된다. 대응책의 하나로 포인트 계측이 있는데, 광 프로브 헤드(광 간섭 프로브도 포함)를 주사하는 3차원 좌표 측정기 등을 생각할 수 있다. 포인트 계측보다도 효율이 좋은 것은 피조 간섭 헤드 주사와 같이

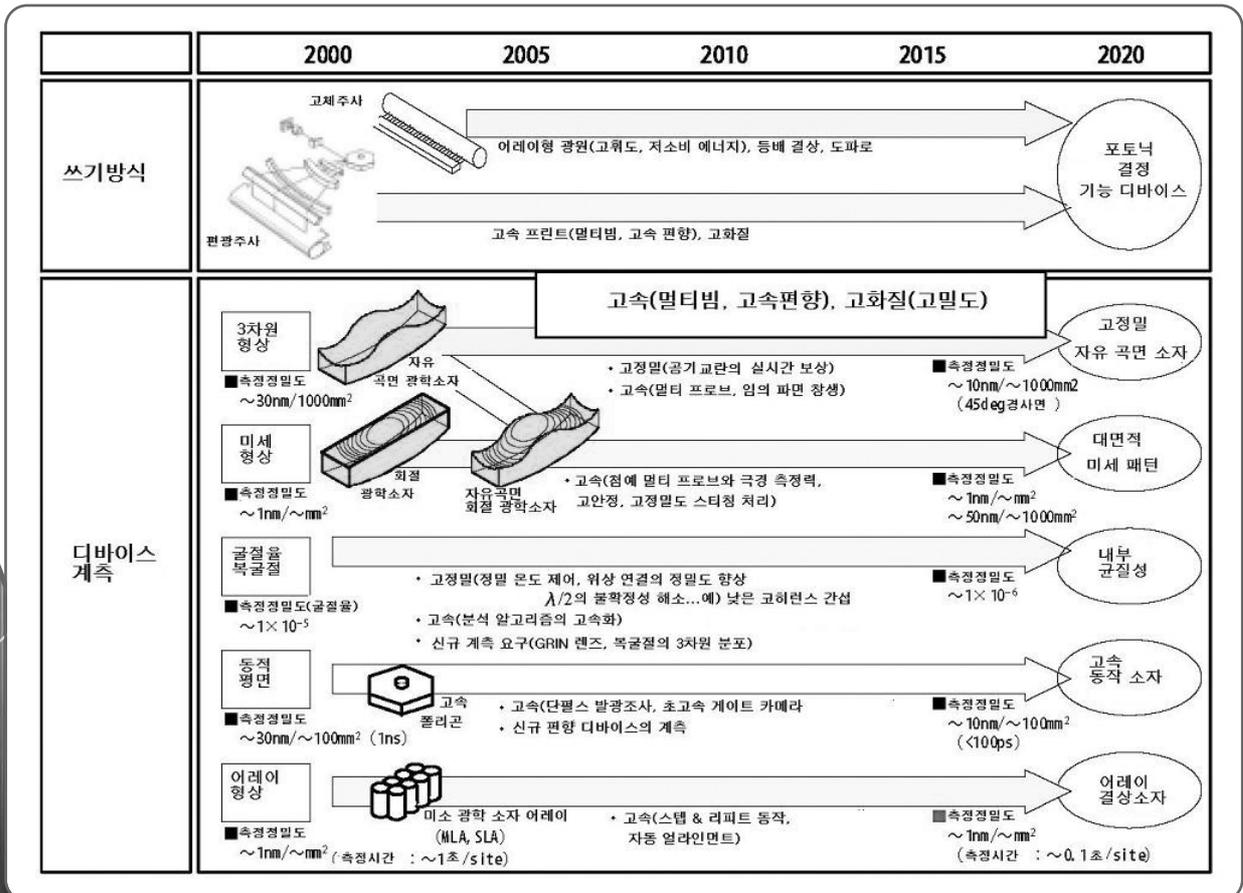


표 1. 레이저 기입 광학 디바이스의 계측 기술 로드맵



어떤 면적을 재면서 패치 워크와 같이 연결해 가는 방식이다. 그러나 이것은 주사의 직선성 오차, 특히 회전 오차로 인해 감도에 영향을 미치는 문제점이 있다. 따라서, 개인적으로는, 어떤 크기의 면적을 동시에 재면서 패치 워크와 같이 연결해 가면서 회전 오차 등 주사 직선성 오차에 의해 감도에 영향이 미치지 않는, 횡 쉬어 간섭 헤드를 주사시키는 간섭계가 유망하다고 생각한다⁹⁾. 횡 쉬어(shear) 간섭계는 계측 파면을 서로 떨어뜨려 간섭시키면 파면의 차이만큼(또는 미분) 간섭 무늬로 나타난다. 이 간섭 무늬는 피조 간섭계와 같이 직접 파면의 등고선을 나타내지 않으므로 직감적으로 알기 어려워 무늬 해석이 필요한데, 장치가 매우 간단(예를 들면 평행 평면판 한 장)하고 광학 조정이 거의 불필요하며, 공통 광 경로이기 때문에 외란에 대하여 강한 특징을 모두 갖는다. 또한, 간섭계가 약간 기울어져도 무늬에 변화가 없으므로, 이 간섭계를 차분 주사하여 넓은 면적의 계측에 효과적일 것으로 생각된다.

피조 간섭계와 같은 참조면과 비교함으로써 평면을 계측하는 방식에서는 참조면의 교정이 필요하다. 현재 세 개의 평면을 사용하여 교정하는 방법¹⁰⁾이나 액면을 이용하는 방법 등이 있으나, 둘 다 결코 사용이 용이하지 않으므로 새로운 교정 방법이 요구된다.

또한 면적이 커지면 그 유지 방법이나 환경에 대한 영향이 문제점으로 발생하는데, 유지 방법이나 온도 등에 따라 형상으로 바뀌게 된다.

② 비구면 계측

구면에 대해서는 현재 시판되고 있는 피조 간섭계로 거의 달성가능하다. 계측 대상의 면적이 커져도 오목면 거울이라면 반사 파면이 집광되므로, 작은 면적에서도 계측이 가능하다. 볼록면에 대해서는 어려운데, 이에 대해서는 후술하기로 한다. 현재 또는 앞으로 중요한 계측 대상은 비구면이다. 비구면은 2차 곡면과 다차 곡면으로 크게 나뉜다. 2차 곡면은 문자 그대로 그 형상이 2차 곡면으로 나타나는 것으로 포물면 거울, 타원면 거울, 쌍곡면 거울의 3종류가 있으며, 각각 평행 파면을 구면파로, 발산 구면파를 수렴(convergence) 구면파로, 구면파를 다른 곡률의 구면파로 수차 없이 변환(또는 그 반대의 변환도)시킬 수 있다. 이것을 구면 거울로 행하고자 하면 수차가 발생한다. 이들 2차 곡면에 관해서는 현재도 계측이 가능¹¹⁾하며, 예를 들면 보조 광학 소자를 사용하여 피조 간섭계로도 계측할 수 있다. 중요한 것은 3차 이상의 비구면에서 점대칭(슈미트

판)인 것이나 비점 대상인 곡면(예를 들면 X선 반사를 위한 트로이달면 등)이 있다. 가장 실용적인 방법은, 오차가 매우 작은 프로토타입을 만들어 일반적인 간섭계(트와이트면 그린 간섭계 등)로 실제의 검사면과 비교하는 것이다. 또는 프로토타입으로 Null 렌즈, CGH(계산기 생성 홀로그래프)를 사용할 수도 있다. 일반적으로는 시간은 걸리지만 간섭 프로브를 사용한 삼차원 좌표 측정기를 사용하면 비점측으로 다차의 면을 계측할 수 있다. 한편 오목면에 비해 볼록면에 대해서는 그 계측이 상당히 어렵다. 앞에서 설명한 바와 같이 피조 간섭계로 볼록 구면을 켈 경우, 곡률 반경에도 영향을 받지만, 일반적으로 그 측정 가능한 면적이 매우 좁아진다. 이는 오목면에서 반사된 파면은 크게 발산되기 때문이다. 일반적으로 간섭계는 완만한 형상 계측에 강한데 반해, 가파른 형상에는 약하다. 극단적인 예로, 깊은 구멍 등에서 부분 반사광이 되돌아오지 않는 가파른 형상은 켈 수 없다.

가파른 형상 중 하나가 단차이다. 단차를 일반적인 간섭계로 측정하고자 하면, 불연속인 간섭 무늬가 되어 무늬 차수를 판별할 수 없게 된다. 이는 백색광 등 간섭도가 작은 광을 사용한 간섭계로 계측할 수 있도록 되어 있다. 단차가 있더라도 간섭 무늬를 판별할 수 있기 때문이다.

앞으로의 과제로서 복잡 형상, 자유 곡면, 높은 영상비를 갖는 면 등을 들 수 있다.

③ 자외 광학 부품 계측

반도체 산업 기술 로드맵으로는, 스테퍼가 그리는 선 폭을 조밀하게 함으로써 회로의 집적도를 상승시키기 위하여 광원의 단파장화를 들 수 있다. 구체적으로는, ArF(193nm), KrF(248nm), VUV(157nm), EUV(13.4nm), X선($\leq 1\text{nm}$), 전자선, F2(157nm)이다. 계측에서도 단파장화는 간섭계의 눈금에 해당하는 파장이 작아지므로 정밀도가 높아짐을 의미한다. 실제로 시판되고 있는 피조 간섭계에서도 청색 광원을 사용한 것이 신제품으로 시판되었다. 아울러, 스테퍼에 이용되는 광학 부품이나 파면을 실제로 사용하는 파장으로 계측하고자 하는 요구가 크며, at-wavelength 계측 즉, 사용 파장 계측이 요구되고 있다. 가시광선에 가까운 자외광의 경우에는 석영 유리 등의 종래의 재료로 만들어진 광학 부품을 사용할 수 있으나, 보다 짧은 자외광은 흡수 때문에 재료가 CaF₂이나 MgF₂로 한정되므로 렌즈 등의 광학 부품을 제작하기가 어렵다. 게다가 간섭계용의 고정밀도 광학 부품을 제작

옵토 메카트로닉스 계측 기술 로드맵 II

하기는 더욱 어렵기 때문에, 현재의 at-wavelength 간섭계는 종래의 간섭계 중에서 매우 간단한 구성인 것으로 한정되어 있다. 그 중 하나가 at-wavelength 점 회절 간섭계이다⁷⁾. 자외광을 광파이버에 통과시키고, 그 단면에서 출사되는 자외광 파면이 구면파인 것을 이용하여 파면이나 면 형상을 계측하는 간단한 것이다. 앞으로는 파장이 1nm보다 작은 단파장 자외광용의 고정밀도 광학 부품이 제작될 것이며, 다양한 단파장 자외광 간섭계가 개발될 것이다.

자외광과 동시에 파장이 1nm 이하인 X선의 리소그래피도 로드맵에 기재되어 있으며, 이를 위한 광학 부품(반사경용 토로이달면이나 집광용 존 플레이트 등)이 개발되고 있어 그 계측도 중요시되고 있다.

④ 동적 계측

지금까지 설명한 측정 대상은 형상 등 정지된 것이었으나, 간섭 계측은 움직이고 있는 대상에도 강하다. 구체적으로는 변위, 변형, 진동 등 생산 라인으로서 흐르고 있는 제품 검사, 생물 등이며, 모두 중요한 계측 대상이다. 변위는 지만 효과(Zeeman Effect)를 이용한 2파장 레이저를 사용한 헤테로다인 간섭에 의해 계측되며, 그 측정 시스템은 이미 시판되고 있다. 변형이나 진동은 종래에는 홀로그래피 간섭이나 스펙클 간섭에 의해 계측되었으나, 종래 가장 많이 사용된 홀로그래피용 사진 건판의 제조가 최근 중지되고, 전자적인 간섭계(TV 홀로그래피 또는 ESPI)가 시판되어 보급되고 있다. 앞으로도 이러한 방향이 주류를 이룰 것이다. 변형의 경우, 종래에는 계측 범위가 좁은 것이 단점이었으나, ESPI를 사용하면 큰 변형도 잴 수 있음을 알 수 있다⁸⁾. 또 진동 계측에서는 정상 진동에서 계측이 더욱 어려운 과도 진동으로 대상을 넓혀야 한다. 광원은 고휘도이며 세로 및 가로 모두의 단일 펄스 레이저 광원이 필요한데, 생산 현장에서 사용하기 위해서는 컴팩트하면서 저렴한 것이 필요하다. 표면 검사의 경우, 넓은 면적에 걸쳐

더 작은 흡집까지 라인 상에서 검사할 수 있을 것이 요구된다. 검사 대상의 면은 조면이지만, 개인적으로는 멀티패스의 광학계에서 감도가 배가된 사입사 간섭계(용어 1) 등이 효과적일 것이다, 장파장(탄산 가스 레이저에 의한 10.6 마이크론의 파장)을 사용하면 거친 면도 가시광선에서의 거울면과 같도록 계측할 수 있을 것이다.

라인 흐름 중에서 검사는 인라인으로부터 온라인으로, 나아가 인프로세스로 고도화된다. 초정밀 가공 선반 상에 존 플레이트 간섭계를 탑재하여 인프로세스 계측하는 시도가 이루어지고 있으며, 앞으로 이러한 방식이 개량을 거듭할 것이다⁹⁾. 이 경우, 간섭 계측의 단점인 내환경성이나 조정의 용이함이 중요해지고, 공통 간섭계(용어 2) 등의 연구가 필요해진다.

최근 현저하게 진보된 라이프 사이언스의 연구는 향후 점점 더 활발해질 것으로 예측되며, 이로 인해 생물이나 생체 계측이 진행될 것으로 예상된다. 생물에서는 현재 현미경으로의 간섭 계측이나 낮은 코히런스 간섭을 이용한 광 CT 기법이 개발되고 있다. 동적 계측은 2차원 상뿐만 아니라 3차원 상의 시간적 변화에 대응할 수 있는 관측이 발전되어 갈 것이다. 일반적으로 고속 현상을 2차원 또는 3차원적으로 파악하여 경시 변화되는 모습을 관측하는 것은 앞으로 아득히 먼 미래의 기술이 될 것이다.

5.3 맺음말

이상으로 간섭 계측의 미래 기술에 대하여 예측하였다. 간섭 계측은 계측 수단으로써의 잠재 능력이 높으며, 지금부터 새로운 광원이나 광학 기능 소자 등의 관련 기술 발전에 의해 점점 더 고도화되어 산업계의 요구에 부응해 나갈 것이다.

◎ 용어

- 1) 경입사 간섭계 : 계측면에 대하여 경사진 방향으로부터 조명하고 그 반사면을 참조면과 간섭시키면, 작은 광학계에서 넓은 범위를 계측할 수 있다. 이 경우 계측 대상은 거친 면일 수도 있다. 경입사에 의해 간섭계의 감도가 떨어지지만, 멀티패스의 광학계를 병용하면 감도를 높게 유지할 수 있다.
- 2) 공통 광 경로 간섭계 : 트와이만 간섭계나 마하젠더 간섭계와 같이 서로 간섭하는 계측 파면과 참조 파면이 각각 다른 광 경로가 아닌, 거의 공통의 광 경로를 지나기 때문에, 공기의 흔들림이나 외부 진동에 강한 간섭계이다. 그와 동시에 간섭계 자체도 컴팩트해



진다. 현재 시판되는 간섭계로서 가장 많이 보급되어 있는 피조 간섭계도 평면 계측시에는 거의 공통 광 경로가 된다. 공통 광 경로

간섭계의 일종인 산란판 간섭계는 참조면을 계측면(오목면 거울)의 일부로 하고 있으며, 이러한 간섭계는 특히 외부 진동에 강하다.

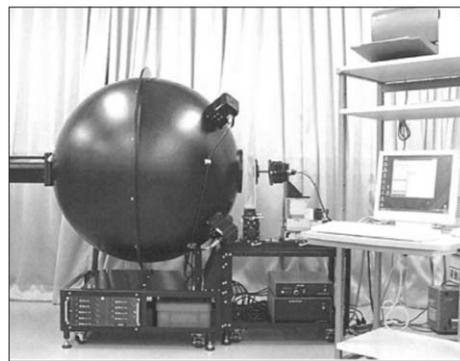
〈참고문헌〉

- 1) (사)일본 반도체 제조 장치 협회 : "반도체 제조 장치 기술 로드맵 2001년도" p46 (2002년 4월)
- 2) 일본 광학 측정기 공업회 "고정밀도 평면의 트레이서빌리티 구 축을 위한 1996년도 평면도 부회 보고서" p3(1997년 11월)
- 3) 상기 p26-p30
- 4) M. P. Rimmer and J. C. Wyant : Appl. Opt. 14, pp142-149(1975)
- 5) M. V. R. K. Marty: Optical Shop Testing, edited by D. Malacara, John Wiley and Sons p41(1978)
- 6) 텐진바야시 고지:정밀 공학회지 56 p2316-p2320(1990)
- 7) 오타키 가쓰라:광학 31 p538-544
- 8) 텐진바야시 고지:기계 기술 연구소 소간행물 47 p47-p53(1993)
- 9) T. Nomura et. al. :Precision Engineering 16 p290-295(1994)

광학신제품 소개

존테크 - Lens Flare을 측정장치

존테크(대표 · 최상규)에서는 Lens의 Flare율을 간단하게 측정할 수 있는 'Lens Flare을 측정장치' 를 새롭게 선보였다. 이 제품은 흑체경과 핀홀을 조합하여 각종 렌즈의 측정이 가능할 뿐만 아니라 소형 렌즈에서부터 대형렌즈는 물론, 프로젝션 렌즈에 이르기까지 쉽게 측정이 가능한 것이 특징이다.



적분구	φ 1000mm 적분구(소형 적분구 가능)
조명	100W, 할로겐 램프×4개(KLV: 모델: CP100)
흑체경	φ6,8,10,13,18,24,35,50,70,100mm(10종)
백체	φ100mm
수광창	φ200mm(피검 렌즈창)
백체부 휘도	18000cd/m ²
색온도	3040K(측정부: 렌즈 Flare율 = 1B/1W×100%, 흑체 휘도)
측정 분해능(Flare율)	0.01%
Flare율 정밀도	0.1% 이하
비상면 조도	광축 중앙에 대해 좌우의 조도를 측정
수광부	수광부 센서 φ0.2mm&0.3mm(2개)
크기, 중량	W1875×H1450×D1100mm, 100kg, 소비류 7A(PC 별도)

