

비구면의 시대 도래

출처 | PHOTONICS SPECTRA 2월호

비구면의 사용으로 광학 설계자들은 최소의 렌즈로 보다 고성능의 광학계를 구현할 수 있게 되었다. 그러나 고정밀 비구면 렌즈는 제작이 까다롭고 비용이 많이 들기 때문에 특별한 용도로만 사용되고 있다. 최근 몇 년 사이에 전통적인 가공 방법과 비교하여 많은 장점을 가지고 있는 자기유동연마(magnetorheological finishing)라는 새로운 비구면 가공기술이 개발되었다. 이 기술은 비구면의 장점을 더욱 다양하게 활용할 수 있도록 하는 첨단 정밀가공기술로 큰 주목을 받고 있다.



비구면의 장 단점

이 기술의 장점은 적절한 크기의 비구면을 정밀하게 가공할 수 있다는 것이다. 구면의 평볼록 렌즈는 광축과 평행하게 입사하는 광선이 한 초점에 정확히 모이지 않는다(그림 1). 이것은 구면만으로 제작된 렌즈에서는 광학수차가 완전히 보정되지 못하여, 모든 광선이 정확하게 모이는 초점이 존재하지 않기 때문이며, 그림 1은 구면수차에 의한 상변짐 현상을 보여주고 있다. 이와 달리 비구면을 사용하는 평볼록 렌즈로 설계하면, 입사 광선을 정확하게 한 점으로 집중시킬 수 있다.

렌즈 시스템 설계자들은 광학수차를 보정

하기 위하여 여러 개의 렌즈를 사용하고 있다. 렌즈가 추가로 사용되면 정렬과 조립과정이 복잡해지고 중량이 늘어나며, 때로는 심각한 비용 문제를 초래하게 된다. 하지만 비구면 렌즈를 사용하면, 렌즈 설계자는 구면만으로는 달성하기 어려운 고성능의 광학계를 만들거나 또는 조립이 쉽고 생산단가가 낮은 광학계를 만드는 등 필요에 따른 여러 가지 선택이 가능하다.

그렇다면 광학 설계에서 비구면 렌즈를 더 광범위하게 사용하지 않는 이유는 무엇인가? 이것은 전통적으로 사용되는 광학렌즈 가공 방법에 그 이유가 있다. 구면을 만드는 과정을 살펴보면, 규정된 곡률반경을 가진 볼록면과 오목면의 사이에 들어있는 연마입자가 렌즈면을 연마하고 있다(그림 2). 이 과정에서 오목면에 대하여 볼록면은 다소 불규칙적인 움직임을 보이며, 이 때문에 구면 형태의 마모가 발생하게 된다. 따라서 렌즈면이 처음에는 구면이 아니더라도 시간이 경과하면서 연마과정에서 발생하는 구면형태의 마모 때문에 렌즈면은 구면으로 가공된다. 여기에 적절하게 연

마방법을 조절하면, 이 방법으로 고정밀도의 구면가공이 가능하다. 예를 들면, 632.8nm에서 $\lambda/4$ (0.158 μ m, 1/600만 inch) 이상의 형상정밀도를 지닌 정밀한 구면도 쉽게 제작할 수 있다.

이에 비하여 비구면을 제작하는 경우에는 연마공구의 움직임을 억제해야 한다. 비구면 형상이 구면에서 약간 벗어난 경우에는 먼저 비구면과 가장 가까운 구면으로 연마한 후에, 이를 다시 비구면으로 연마하는 것이 일반적이다. 최종 비구면 연마는 비구면 가공기에서 렌즈면에 비하여 구경이 아주 작은 연마공구를 사용하여 이루어진다. 연마공구에 의하여 렌즈면의 특정 부분이 연마되는 양을 적절하게 조절하면, 원하는 비구면 형상을 가공할 수 있다.

비구면의 형상이 구면에서 상당히 벗어난 경우에는 컴퓨터 수치 제어 면형상 가공기를 사용하여 렌즈면을 직접 비구면으로 가공

하는 것이 일반적이다. 앞의 경우와 마찬가지로 먼저 가장 가까운 구면을 만든 후에 이를 다시 비구면으로 가공할 수도 있다. 렌즈면이 원하는 비구면 형상을 갖게 되면, 다음 목표는 마모량을 최소로 하면서 면을 매끈하게 연마하는 것이다. 이 과정에서는 비구면 연마기와 아주 작은 구경의 연마공구를 사용하여 반복적인 과정을 거쳐 연마가 이루어진다.

유감스럽게도 이러한 방식의 비구면 연마는 환경조건과 작업자의 태도에 따라 연마정도가 달라지기 때문에 좋은 결과를 얻기 위해서는 고도의 숙련도가 요구된다. 그리고 기계적 가공에는 한계가 있기 때문에 일반적으로는 $\lambda/20$ 이상의 면형상 정밀도를 얻기가 매우 힘들다. 정밀 비구면의 가공에는 면형상 검사와 수정연마가 반복적으로 이루어져야 하며, 때로는 수일 또는 수주의 작업이 요구되기도 한다. 결과적으로 이 방식으로 제작되는 고정밀 비구면은 구면에 비해 엄청나게 고가일 수도 있다는 것이다.

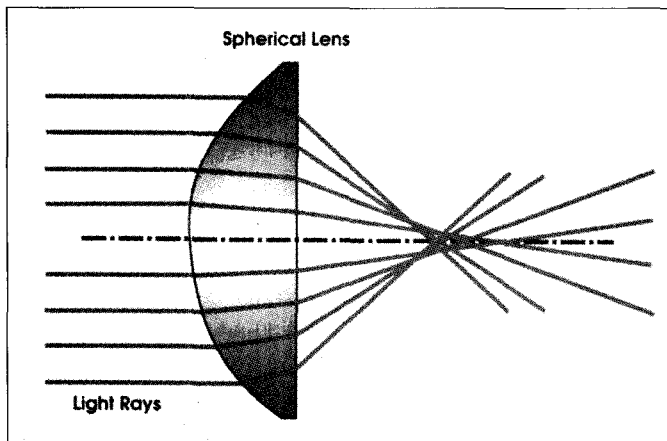


그림 1. 구면수차에 의한 상변질. 이 때문에 렌즈의 해상력이 저하된다.

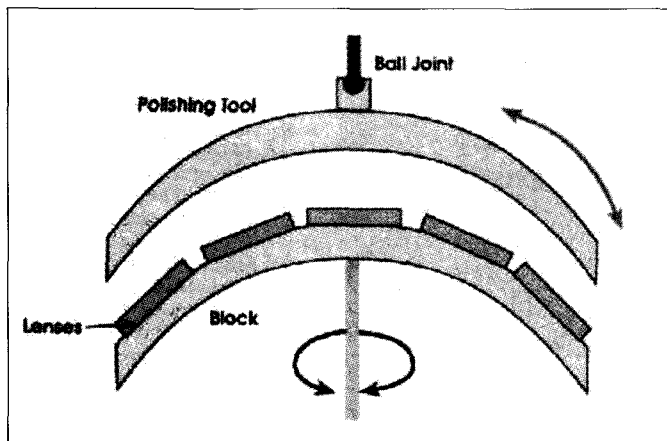


그림 2. 전통적인 연마법, 고정되어 회전하는 렌즈면에 연마공구가 밀착하여 움직이면서 자연스럽게 구면이 형성된다.

한계점의 해결

자기유동 연마 기술은 뉴욕에 위치한 로체스터대학교의 광학제작센터(Center for Optics Manufacturing, COM)에서 개발하여 로체스터 소재의 QED Technologies Inc.가 상용화하였으며, 기술 개발의 목표는 전통적인 광학 연마법의 한계를 극복하는 것이었다.

이것은 고정밀도의 비구면을 신뢰성 있게 대량으로 생산이 가능하도록 하는 결정적인 기술이 될 수 있다. 이 기술은 기존의 방법에 비하여 작업자 개인에 대한 기술적 의존도가 낮고, 작업시간을 상당량 감소시키며, 면형상 정밀도를 $\lambda/40$ 까지 높일 수 있다는 장점이 있다.

이 방식의 연마기에는 소량의 자기유동성

유체를 계속적으로 공급하는 펌프가 있으며, 이 유체는 회전하는 연마바퀴 위로 분사되어 얇은 띠 형태를 만들게 된다. 연마할 렌즈면에 유체가 닿으면, 연마바퀴 아래에 있는 전자석이 강한 자기장을 만들며, 자기유동 유체는 이 자장에 의하여 경화된다. 자기유동 유체는 자기장이 없어지면 다시 유동성의 액체가 된다.

자기장에 의하여 경화된 유체가 연마공구 역할을 한다. 자기유동성 유체는 가공될 렌즈면을 지난 뒤에는 다시 액화되며, 펌프를 통해 흡입되어 순환하며 재사용된다(그림 3).

연마는 유체 연마공구의 정확한 형태와 이에 의한 연마특성을 결정하는 시험으로부터 시작된다. 가공하고자 하는 렌즈면의 형상오차(현재의 면형상과 원하는 면형상 간의 차이)를 입력하면, 제어 프로그램은 이 정보를 이용하여 렌즈를 이송하는 수치제어 장치에 기준치를 설정하여 주게 된다.

렌즈는 연마되는 동안 스펀들 위에서 회전하며(그림 4), 일부가 유체에 닿은 상태에서 천천히 기울어지면서 가공된다. 이 과정에서 기준면과 유체와의 간극은 일정하게 유지된다.

제어 프로그램은 연마기의 가동속도를 제어하여, 필요한 만큼 표면을 연마를 통하여 제거한다. 즉 기준면 보다 높은 부분을 연마할 때 더 많은 연마시간을 소비하게 된다.

자기유동연마는 연마공구 자체의 마모가 발생하지 않는다. 따라서 연마공구의 연마 특성이 시간적으로 변화하지 않는다는 결정적인 장점을 가지고 있으며, 유일한 변수는 연마되는 시간이다. 이것이 자기유동연마의 핵심에 해당한다.

연마공구의 상태는 항상 일정하게 유지되며, 유체에 의한 연마 랩은 항상 렌즈면의 형상과 완전하게 일치하게 된다. 이것은 마모로 인하여 작업소재와 공구의 접촉이 불규칙하고 예측이 어려운 전통적인 광학 연

마 방식과는 전혀 다르다. 또한 이 연마기는 온도, 점도, 증발 속도 등과 같은 유체의 특성을 지속적으로 감시하여 일정하게 제어함으로써 작업환경이 일정하게 유지되도록 하고 있다.

연마시 작용하는 힘의 특성도 역시 전통적인 연마와는 다르다. 렌즈면과 연마유체가 접촉하는 부분에서는 약 2mm 정도의 두께를 가진 유체 띠를 압력을 가하여 1mm 정도로 얇게 만들며 주며, 이에 따라 발생하는 전단 응력이 연마 작용을 일으킨다. 전통적인 연마방식에서는 수직 방향으로 가공면에 힘이 가해지게 된다. 완전한 공구 접촉과 전단 응력의 조합으로 연마속도가 매우 빨라진다. 실제로, $\lambda/20$ 의 정밀도를 지닌 비구면을 몇 분 내에 만들 수 있다. 또한 자기유동연마는 전통적인 연마 방식보다 표면 하부조직의 손상이 적은 광학부품의 제작이 가능하다.

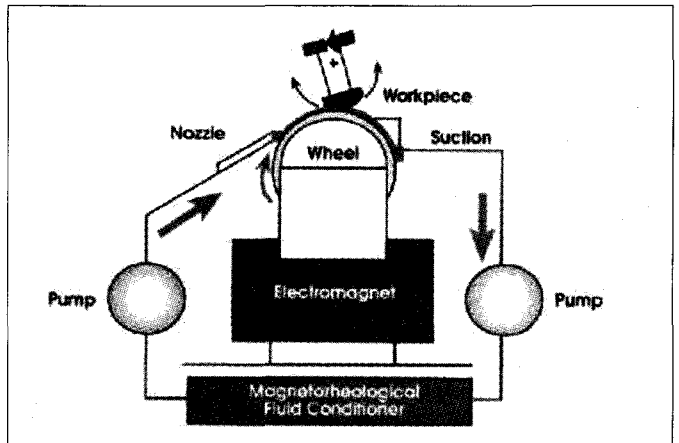


그림 3. 자기유동 연마기, 자기유동성 유체를 순환시키는 펌프, 전자석과 회전판, 렌즈 이송장치로 구성된다.

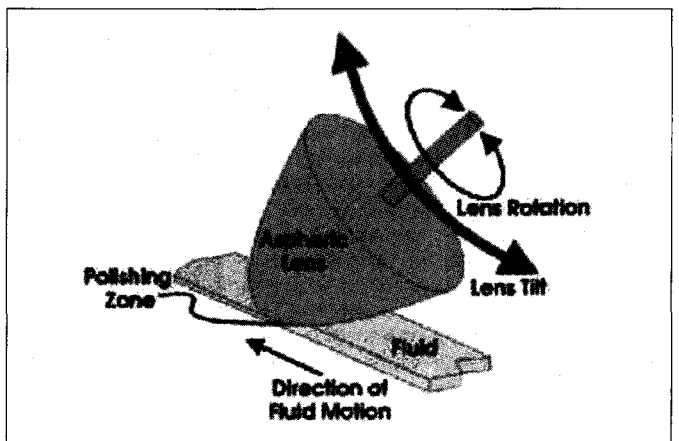


그림 4. 연마부를 확대한 그림: 렌즈면이 얇은 유체의 띠에 접한 모습을 보여준다.

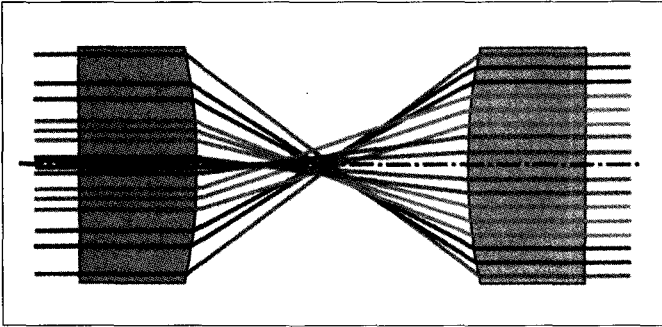


그림 5. 광속 정형계에서 입사광의 각배율은 구경에 따라 달라진다. 가우시안 광속에서 중심부의 강한 광속은 가장자리보다 크게 확대된다. 두 번째 렌즈는 평행 광을 만드는 역할을 한다.

비구면 광속 정형계

캘리포니아, 알바인에 위치한 Newport Corp.에서는 자사 제품인 굴절형 광속 정형계에 비구면 렌즈를 사용하고 있다. 이 광학계는 레이저의 가우시안 광속을 균일한 강도 분포를 갖는 광속으로 변환한다. 이 제품은 대용량 저장장치, 재료처리, 생체 의광학 및 전기광학장치에 사용되고 있다. 캘리포니아 산호세에 있는 IBM 연구소의 John Hoffnagle과 Michael Jefferson가 설계한 비구면 광속 정형 렌즈는 자기유동 연마를 사용하여 Newport사에서 제작되었다.

가우시안 분포를 가진 광속을 균일한 강도 분포로 변환시키면서 광손실이 낮은 광속 정형 광학계를 설계하고자 하는 많은 시도가 있었지만, 이 비구면 렌즈계는 성능, 생산성, 편의성의 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 이 광학계는 단지 2개의 평볼록 비구면 렌즈로 구성된다(그림 5). 첫 번째 렌즈는 렌즈의 중심부로 입사하는 광선이 가장자리 부근으로 입사하는 광선보다 더 크게 확대 되도록 설계되어 있어, 두 번째 렌즈에서 평행광으로 만들어져 출사될 때에는 균일한 강도분포를 갖게 된다. 두 개의 비구면 렌즈는 용융 실리카로 제작되어 있다.

이 광학계는 입사각이 작게 설계되어 있으며, 실리카는 굴절률 분산이 적어 파장이 바뀌어도 수차특성이 거의 변화하지 않는다. 따라서 파장에 따라 렌즈간의 간격을 적절하게 조정하여 주면, 넓은 파장 대역에 걸쳐 사용이 가능하다. 구면만으로도 이것과 동일한 특성을 가진 광학계를 만들 수는 있으나, 여러 개의 렌즈가 사용되어야 한다. 그리고 렌즈의 정렬상태와 제작공차에 따라 성능이 변화하는 단점이 있다. 제1렌즈가 비구면 오목렌즈인 갈릴레오 형식의 광학계도 광속 정형 광학계로 사용될 수 있으나, 비구면 오

목 렌즈는 비구면 볼록 렌즈보다 제작이 까다롭다.

이 광속 정형계는 직경($1/e^2$ 지점) 4.7mm의 가우시안 광속에 대하여 최적화 되어 있으며, 출력 광속의 직경은 8.1mm이고, 강도의 균일도는 10% rms 이내이며, 효율은 97%이다. 입사 광속의 직경은 대부분 레이저의 출력광속보다 다소 크다. 광속의 직경을 줄이면 전체 크기의 축소도 가능하며, 렌즈를 극도로 작게 만들 수도 있다. 그러나, 이 경우는 자기유동 연마에서 가공이 어려워지는 문제점이 있다.

이 때에는 광속 확대기를 사용하여 입사광속을 크게 할 수도 있고, 필요하다면 공간 거르개를 사용하여 매끈한 가우시안 분포를 만들 수도 있다. 또한 광 섬유를 사용하여 필요한 강도 분포와 광속의 직경을 만들어 줄 수도 있다.

광속 정형계가 제대로 성능을 내려면 입사광속과 렌즈가 올바르게 정렬되어야 하고, 렌즈간의 간격이 파장에 맞도록 조절되어 있어야 한다. 층밀리기 간섭계나 Shack-Hartmann 검사법을 사용하면 광속 정형계를 바르게 조정할 수 있다.

비구면의 장점

결론적으로 비구면을 사용하여 광학 설계자들은 사용되는 렌즈를 최소한으로 줄이면서도 고성능의 정교한 광학계를 설계할 수 있다. 또한 자기유동연마를 통하여 렌즈 생산 업체에서는 낮은 비용으로 고성능의 비구면 광학계를 효율적으로 생산할 수 있게 되었다.