

광학소자의 가공

# 광학 비구면의 창성기술(1)

비구면 가공은 단순하게 생각하면, 주어진 광학 소재의 표면에 지정된 형상을 가공 부여하는 것이라 할 수 있다. 그런데 비구면 가공 기술은 아직 완전히 확립되었다고 볼 수 없다. 동일한 목적으로 사용되는 비구면에서도 가공 방법은 제작자(메이커)에 따라 원리적으로 차이가 있거나 또는 재료에 있어서도 가공 기술의 전문도에 따라서 서로 다른 것이 선택되는 일도 많다. 본 고에서는 주로 렌즈 및 성형 금형의 비구면을 대상으로 하여, 현재 이미 실용화 단계에 있는 창성 가공법에 대해서 설명하겠다.

편집자 주

비구면 가공은 단순하게 생각하면, 주어진 광학 소재의 표면에 지정된 형상을 가공 부여하는 것이라 할 수 있다. 예를 들어 카메라 촬영용 비구면 렌즈의 경우, 그 형상은 구면이나 평면이나의 차이가 별로 없고 게다가 일반적으로는 회전축에 대칭하기 때문에 어떻게 보면 가공은 용이하다고 생각할 수 있다.

그럼에도 불구하고 이전에는 이러한 가공이 아주 어렵게 여겨져 왔다. 이렇게 된 중요한 이유로는 3가지를 들 수 있다.

- 1) 형상이 설계로 산출된 자유 형상이기 때문에 일반적인 공작법으로는 창성하기 어렵다.
- 2) 필요로 하는 형상 정도(精度)가 높아, 일반 공작 기술의 한계를 넘고 있다.
- 3) 가공 다듬질면이 광학 정면이어야만 한다.

더욱이, 그러한 형상을 측정 및 평가하는 수단이 없었다는 것도 가공이 불가능했던 원인이었다.

구면이나 평면 광학 부품인 경우, 가공은 이른바 광학 연마(이하 "연마"라고 한다)를 통해서 이루어졌다. 연마는 기본적으로는 부품과 면공구를 적당한 지립을 매개로 구석구석까지 문질러서 실시하는 가공으로, 그에 따라 구면으로 하든 평면으로 하든, 국

부적으로 돌출한 부분은 닳아 없어지게 하여 양쪽이 상대적으로 운동하더라도 전면에 서로 밀착하는 형상, 다시 말해 진구 또는 진평면에 근공구시켜가는 것이기 때문에, 높은 면 정도에 도달할 수 있다. 게다가 연마에 있어서는 작업물과 공구의 상대 운동 조건을 조절하여 가공면의 곡률을 미세하게 변화시킬 수 있었다. 연마에서는 사용 공구나 지립의 재질, 입경을 선택하여, 유리 등의 재료면을 재빠르게 거칠게 가공 성형하는 것도 가능하였으며 광학적으로 매끄러운 경면을 생성시킬 수도 있었다. 비구면 형상에서는 이와 같이 문질러기 방식의 가공이 불가능하다는 것은 주지의 사실이다.

현대의 상식적인 공작 기술에서 생각해 보면, 비구면과 같이 임의의 형상은 NC장치 등으로 작업물에 대한 공구의 상대 위치를 적당하게 제어하면서 가공하면 되었을 것이다.

그러한 가공 시스템에 최신 초정밀 기술 요소를 첨가하면, 필요로 하는 형상 정도를 만족시켜 비구면 렌즈 등을 얻을 수 있으리라 생각된다. 하지만 현실적으로 비구면 가공은 일반적인 의미로는 용이하게 이루어진다고는 말하기 어렵다.

가공상 문제가 되는 것 중 한가지는 광학용 비구면 재질이다. 재

질로는 대부분 유리나 금형으로서의 경질 재료가 사용되는데, 이 때의 제거 가공법은 연삭으로 한정된다(최근에는 열 프레스 성형의 성공 예도 나타나기 시작했지만). 연삭에서는 일반적으로 거칠기를 가진 가공층이 생기기 때문에 이것을 완전한 경면으로 만들기 위해서는 별도의 가공법을 추가할 필요가 있다. 재료에 따라서 절삭이 가능한 것도 있지만, 초정밀 절삭을 통해서 얻어진 거의 경면에 가깝다고 여겨지는 가공면에서도 절삭 흔적을 완전하게 제거해야만 광학적으로 사용할 수 있는 경우가 많다. 또한 가공 능률면에서 살펴보면, 초정밀 가공은 일반적으로 재료 제거 속도가 현저하게 느리기 때문에, 이것을 양산 비구면 가공에 그대로 사용하면 비용면에서도 문제가 있다.

현재 이러한 상황이므로, 비구면 가공 기술은 아직 완전히 확립되었다고 볼 수 없다.

동일한 목적으로 사용되는 비구면에서도 이러한 가공 방법은 제작자(메이커)에 따라 원리적으로 차이가 있거나 또는 재료에 있어서도 가공 기술의 전문도에 따라서 서로 다른 것이 선택되는 일도 많다.

여기서는 주로 렌즈 및 성형 금형의 비구면(이하, 혼동되지 않는 한 이것을 포함해서 '비구면 렌즈등'이라고 한다.)을 대상으로 하여, 현재 이미 실용화 단계에 있는 창성 가공법에 대해서 설명하겠다. 또한 여기서 말하는 창성 가공법은 형상의 창출과 광학 경면의 생성을 모두 포함한다.

### 1. 비구면 렌즈의 형상과 정도

비구면의 형상 가공을 일반적인 가공 기술에서 제외하는 최대의 원인은 필요로 하는 정도(精度)가 높다는 것에 있다. 여기서는 우선 그러한 정도가 어느 정도인가에 대해서 설명하겠다. 비구면은 결상계 렌즈로 사용되는 것 외에도 집광계, 광학 보정계, 광반사 소자 등 광학적 용도로 사용되며, 각각 부품의 형상이나 정도는 다르지만 여기서는 일반적인 렌즈의 경우를 예로 들어서 설명하겠다.

카메라등에 사용하는 비구면 렌즈는 일반적으로 회전축이 대칭이며, 그 형상은 광학 설계의 편의상 다음과 같은 고차 다항식으로 표현할 수 있다.

식의 x 좌표는 렌즈의 중심축(광축), y축은 렌즈의 반경 방향으로 잡는다.

$$x = \frac{\frac{1}{r_0} y^2}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{y}{r_0}\right)^2}} + \sum_{i=1}^n a_i y^i$$

식의 제 2항 이하가 비구면항으로, 계수  $a_i$ 에 따라서 비구면의

정도(구면과의 형상 차)가 정해진다. 제 1항의  $r_0$ 는 렌즈의 정점에서 곡률 반경을 나타내고, vertex R, 또는 근축 R 등으로 불리는데 설계상 의미를 가지는 값이다. 비구면의 실제 가공이나 측정에 관해서는 그림 1에 나타나 있듯이 렌즈의 정점과 바깥 가장자리를 포락하는 구면을 기준 구면으로 하여 이것을 비구면에 대한 참조 구면이라고 부른다.

이 경우, 참조 구면의 중심을 원점으로 하는 극좌표에 따라서 비구면 형상이 나타나고, 이것과 참조 구면의 차  $\Delta R(\theta)$ 를 중심각(광축에서 측정)에서의 비구면양이라고 부른다.

비구면의 가공이나 측정을 극좌표 방식으로 진행할 경우, 참조 구면의 곡률 반경과 비구면량이 기계 장치의 사양 결정에 있어서 의미를 지닌다(형상이 평면에 가까운 경우에는 기준면으로 평면을 택한 후, 위와 같이 생각하는 것이 좋다.).

비구면 렌즈의 형상은 오목면이든 볼록면이든 상관 없지만, 카메라용일 경우에는 비구면양은 수 $\mu$ m에서 1mm정도까지 크며, 이러한 극한값도 1군데 있는등 비교적 완만한 모양이 되는 경우가 많다.

실제로 가공된 비구면 형상의 정확도는 각 점에서의 비구면양과 설계값과의 차이로 나타낼 수 있다

하지만 렌즈의 경우, 그러한 값만으로는 광학적 평가가 곤란하므로, 특별한 정도 표시법에 대해서 여러 가지로 제안되고 있다. 그림 2는 비구면의 형상 오차를 figure(f), accuracy(a), smoothness(s)라는 3가지 항목으로 표시하고 있다.<sup>1)</sup> figure는 각 점의 측정값에서 최소 자승 근사값으로 구해진 오차 근사 비구면과 설계 비구면과의 차이(바깥 둘레에서의 값으로 표시), accuracy는 각 점과 오차 근사 비구면의 차이, smoothness는 가공된 면의 오차 근사 비구면에 대한 기울기의 오차를 나타내고 있다. 일반적인 카메라나 비디오 카메라의 촬영용 렌즈의 경우, 이러한 오차의 허용치는  $f = \pm 1\mu\text{m}$ ,  $a = \pm 0.1\mu\text{m}$ ,  $s = \pm 1/5000\text{rad}$  정도가 된다.

그림 3은 비구면 형상의 오차 성분에 대한 또 다른 표시 방법인데, 이 경우는 35mm 카메라용 렌즈에 대한 허용치의 예로서, 형상 편차  $a \leq 1\mu\text{m}$ , 물결  $\theta \leq 1/1000\text{rad}$ 가 표시되어 있다.<sup>2)</sup>

실제 가공에서는 그림 2의 accuracy(물결)에는 한층 더 미세한 거칠기를 가진 요철 성분이 포함되어 있는 경우가 많다.

그것은 accuracy로서는 작다고 하더라도 그 첨단도( $d^2(R/d\theta^2)$ )는 렌즈등의 성능에 커다란 영향을 주고 있다. 렌즈등을 작업물에 대한 공구의 상대 궤적 운동을 통해서 가공하는 경우,  $d^2(\Delta R/d\theta^2)$ 가 작아지게 하려면 공구 위치 결정 정도를 작게 해야만 한다. 이러한 점에서 카메라용 렌즈등을 창성 가공하기 위해서는 0.02~0.01 $\mu\text{m}$  정도의 공구 위치 결정 정도가 필요하다(이 값은 표면 거칠기와 동등한 오더이다. 양쪽의 차이점은 표면 거칠기는 연마를 통해서 제거되지만, 물결 형상은 완전하게 연마된 후에도 보존되는 경우가 많다.).

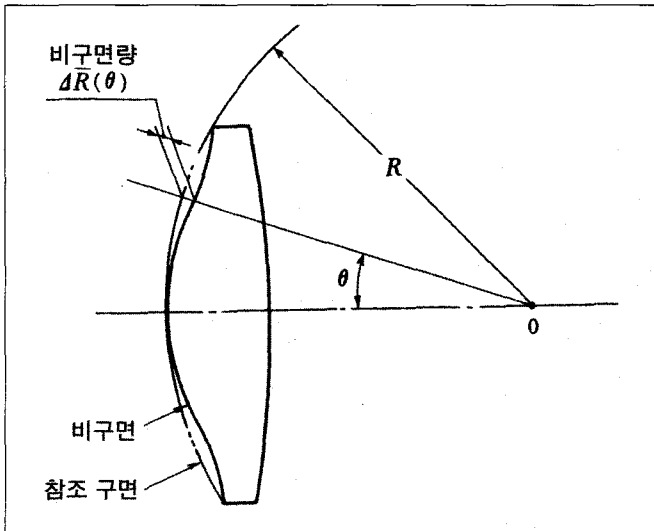


그림 1. 극좌표에 의한 비구면 표시 방법

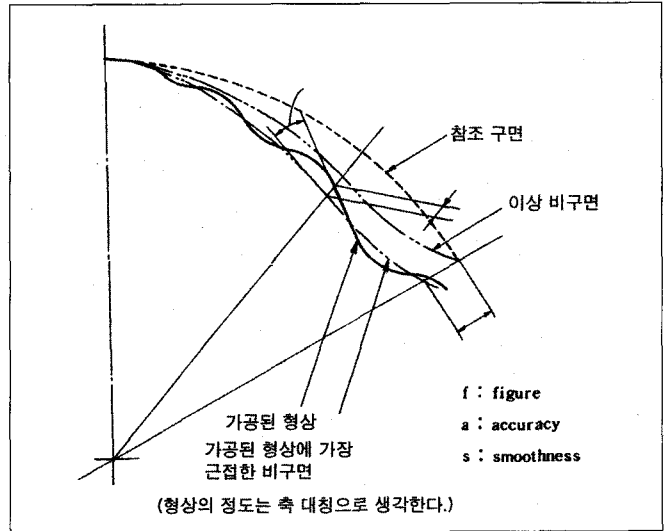


그림 2. 비구면 형상의 정도 표시 방법(마사이)

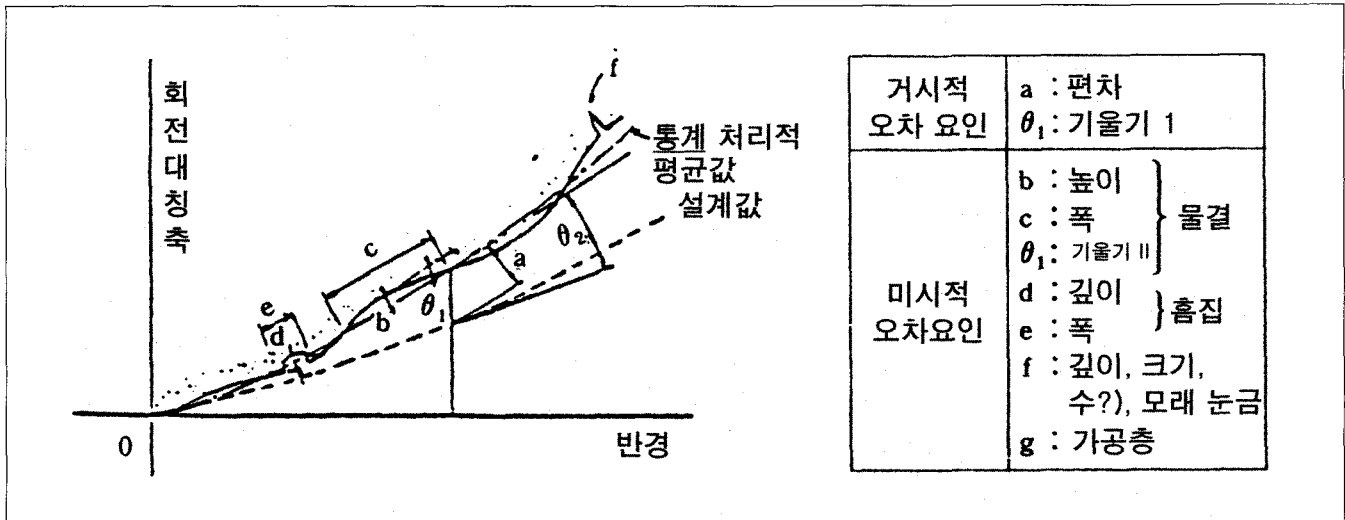


그림 3 비구면 형상의 정도 표시 방법(오차 요인) (히시모토)

가장 정확한 정도 조건은 결국 이러한 값(±0.02μm 등)으로 정해지는 경우가 많은데, 가공기의 제어 분해능으로서는 이것과 동등하거나 그 이상의 값이 바람직하다.

## 2. 비구면 형상의 창성 원리

비구면 가공을 형상 창성의 원리를 통해서 살펴 보면, 표 1과 같이 4가지 방식으로 나뉜다.

공구 궤적 제어 방식에서는 공구와 작업물의 상대 위치를 연속적으로 제어하고, 이 때 공구의 궤적이 작업물과 간섭하는 부분의 재료가 제거됨으로써 필요로 하는 부품의 형상이 만들어진다.

따라서 만들 수 있는 부품 형상 정도의 한계는 공구 궤적의 제어

정도이고, 공구 선단부를 이용한 재료의 피가공 거동에 따라, 공구 궤적과 창성되는 형상에서 차이가 발생한다.

제거 두께 제어 방식은 가공 전에 면 형상을 측정하여 그것을 목표 형상과 비교해서 너무 두꺼운 부분의 재료만을 제거한 후, 전체면을 목표 형상에 도달시키는 방법이다. 정확하게 형상을 측정하는 수단을 가지고서, 분해 능력이 높은 제거 가공법을 이용하면 원리적으로는 높은 형상의 정도를 얻을 수 있다. 이 경우 가공법으로 광학 연마를 사용하면, 재료의 제거 두께는 연마 시간을 조절하여 지극히 높은 정도로 제어할 수 있다.

단, 마모 형상 그 자체는 감모 두께의 면방향(가로 방향) 분포로 인해서 발생하는데, 이것은 공구의 형상, 운동 조건에 따라서 결정되므로 그것들을 정확하게 설정하는 것은 상당히 어렵다.

부가 두께 제어 방식에서는 구면, 평면 등을 기관으로 사용하며,

그 면 위의 각 부분에 두께 분포가 필요한 형상을 만들어 낼 수 있도록 재료를 제어하면서 부착시켜, 면 전체를 목표 형상에 도달시키는 것이다. 유리 부품의 경우, 재료 부가에는 진공 증착을 이용하며 또한 두께의 부분적 제어를 위해서는 적당한 개구 마스크를 사용한다.

형상 전사는 이른바 금형을 이용하는 성형이다(이하, 소재의 금형 형상을 본떠 부품의 형상을 만들어 내는 공정을 '소성형'이라고 부르는 경우가 있다. 단, 이것은 일반인에게 알려진 용어는 아니다). 플라스틱, 유리 등 소성형이 가능한 재료에 대해서만 실시할 수 있다. 이 경우 금형의 정도와 성형에 의한 형상 전사의 충실성으로 인해 부품 형상의 정도가 결정된다. 또한 재료 내부의 상태는 이 공정의 영향을 받아서 결정되기 때문에 공정은 형상 정도와 함께 재료 내부의 광학적 성능을 보증할 수 있는 것이어야만 한다.

이상의 4가지 방식에 있어서 종래, 정도가 높은 비구면을 얻기 위해서는 제거 두께를 제어하는 경우가 많았지만, 이런 경우 기능 및 시행 착오적 요소가 많다는 결점이 있고 또한 가공 시간이 지극히 많이 소요된다. 단 측정 수단이 있었다면, 다른 어떠한 방식보다도 높은 정도를 얻기 쉬웠을 것이다. 한편 공구 궤적 제어 방식은 기계가 부품 도달 정도의 결정 수단이 되는 것이었다. 따라서 최근의 초정밀 기계 기술의 현저한 발전과 함께 이러한 방식이 실용화되는 경우도 늘어나고 있다. 최근 일본에서 카메라 및 CD 픽업 분야에 갑자기 다량의 비구면 렌즈가 사용되기

시작한 것은 이 방식의 가공기가 시장에도 선보이게 됨에 따라 비구면(대부분은 성형용 금형)을 생산하는 일이 가능해졌기 때문이라고 생각된다. 단 현재의 방식으로는 렌즈등이 필요로 하는 최종적인 면 성상을 얻기가 힘들기 때문에 형상 창성 가공 후, 완전한 광학 경면을 얻기 위해서는 별도의 가공법을 추가해야 한다

부가 두께 제어는 진공 증착의 경우, 가공 단위는 원자 혹은 분자 오더가 되므로 가공 분해능은 상당히 높다. 하지만 가공 분해능과 가공 능률은 상반 관계에 있다는 일반적인 통념대로 이 방식은 가공 시간이 상당히 오래 걸린다. 또한 현재의 기술로는 부가 두께에 한계가 있기 때문에 두께를 늘리는 것은 불가능하다. 이러한 2가지 이유때문에 특별한 경우에만 이용할 수 있는 창성 방식이라고 생각된다. 형상 전사는 원래는 형상 창성법이라고 하기는 어려우나, 재료에 비구면 형상을 부여하는 공정임에는 틀림없기 때문에 여기서는 창성법의 하나로 간주하여 설명하겠다. 말할 것도 없이 이것은 가장 효율이 높은 비구면 제작법이다. 단, 이 공정의 전제 조건으로는 양산용 금형 제작이 가능해야 한다는 점, 그리고 부품 재료의 소성형 기술이 확립되어 있어야 한다는 점 등을 들 수 있다.

다음 호에서는 각 창성 방식의 내용에 대해서 설명하겠다.

>>자료출처 : 일본옵토메카트로닉스협회

## 늘 곁에 있어 소홀하지는 않으십니까?

여기서 잠깐!

'광학세계'가 산업계, 학계, 연구계의 큰 관심과 기대 속에서 유일한 전문지로 태어난지가 벌써 14년이 되었습니다. 긴 시간 한결같이 베풀어 주신 지원과 보살핌에 진정으로 감사드립니다. 그동안 '광학세계'는 부족하나마 광산업 각 분야별 국내외의 시장 동향 및 신기술을 소개하고 학계 및 연구계와 자연스러운 교류의 장을 만들면서 광학인들의 공동 발전을 위한 가교 역할을 해왔다고 감히 자부합니다. 그러나 최근 여러분의 관심이 부쩍 줄어 안타깝습니다. 항상 곁에 있는 것에 소중함을 느끼지 못하듯이, 혹시 너무 오랫동안 쉽게 접할 수 있는 '광학세계'였기에 소홀하지는 않으신지요? 독자 여러분의 우송료 납부와 질적 향상을 위한 적극적인 참여가 절실합니다.

### 하나, 우송료 12,000원을 내주세요

'광학세계'는 1년 우송료 12,000원 외에 따로 책값을 받지 않았습니다. 그럼에도 대다수 정기구독자가 우송료조차 납부하지 않는 '무료 독자'입니다. '광학세계'는 순수하게 광고비로만 발간되고 있습니다. 최근 광고도 급격히 줄어 우송료마저 큰 부담이 되고 있습니다. 우송료 납부에 자발적으로 참여해 주시고, 입금후에는 꼭 연락 주시기 바랍니다.

입금계좌 : 국민은행 084-01-0156-856

예금주 : 한국광학기기협회

### 둘, 원고 투고를 기다립니다.

'광학세계'는 항상 여러분의 의견에 귀 기울입니다. 원고 기고, 기획 제안 등 여러 가지 방법으로 참여해 주십시오.

1. 원고 기고-논문, 국내외 신기술·동향, 전시회 참관기, 연수기, 수필 등
2. 추천-모범사원을 추천해 주세요. '이달의 광학인'에 선정, 직접 취재하겠습니다.
3. 기획 제안-원고 내용이나 편집에 의견이 있으면 언제든지 연락 주십시오.

「광학세계」편집부

주소 : (137-842)서울시 서초구 방배동 912-5 백산커뮤니티빌딩 4층 한국광학기기협회

전화 : (02)581-2321/팩스 : (02)588-7869/이메일 : pjy@koia.or.kr