

광학소자의 가공

제거 두께 제어를 통한 형상 창성(2)

제거 두께 제어를 통한 형상 창성 원리는 부분연마라고도 하는데 이 가공법에서는 작업면에 비해 크기가 작은 면 접촉 공구를 사용하고, 두 개를 서로 문질러서 가공한다. 연마 감모량은 공구와 재료 면의 접촉 압력 및 두 개의 상대적인 마찰 거리에 의해 결정되지만, 상대 마찰 거리는 면 안의 각 점에서 일반적으로 동일하지는 않으며, 또 그 값은 공구 운동 방법에 따라 다르기 때문에 감모 형상은 설정한 연마 조건에 따라 여러 가지 형태를 보이게 된다. 본 고에서는 이러한 제거 두께 제어를 통한 형상 창성 가공법에 대해서 설명하겠다.

편집자 주

1. 형상 창성의 원리

이 창성 방법의 원리는 비구면에 가까운 형상의 구면 또는 평면을 블랭크로 하고, 이것과 목표 비구면 두께의 차분에 해당하는 재료를 부분적으로 제거해서 필요로 하는 형상을 얻는 것이다. 이 경우, 재료 제거는 보통 연마를 이용한다. 따라서 이 가공법을 부분 연마라고 부를 수 있다.

하지만 일반적으로 연마는 작업물의 가공면에 그것과 동일한 곡률을 가진 공구를 접촉시켜서, 유리 지립을 뿌려가면서 작업물과 공구를 서로 문질러는 가공이다. 이 중 작업물에 형상을 만들기 위해서 딱딱한 공구(주철등)와 딱딱한 지립(산화 알루미늄, 탄화 규소분 등)을 이용하는 경우를 랩핑(lapping), 또 경면 생성을 얻기 위해서 일종의 탄성을 가진 공구(피치, 폴리우레탄 등)와 경면 가공 지립(산화철미분, 산화 세륨분 등)을 사용하는 경우를 폴리싱(polishing)이라고 부른다.

연마는 압력 절입형 가공인데 그 특징 중 하나는 가공 조건을 일정하게 하면 제거 두께가 시간과 정확하게 비례한다는 것이다. 게다가 그러한 시간 제거율(제거 두께/시간)을 아주 작게 할 수 있기 때문에, 생성된 제거 두께에 있어 시간을 파라미터로 하여 아주 높은 분해능으로 제어할 수가 있다.

그리고 또 다른 특징은 연마를 통해서 재료 제거가 재료의 표면부터 순차적으로 진행되어가므로, 제거 깊이 방향의 가공 치수가 기계에 의해서가 아니라 표면 그 자체를 기준으로 해서 결정된다는 것이다. 때문에 연마에 있어서 이론적으로 가공 치수는 기계의 정도에 영향을 받지 않는다. 따라서 작업물면에 대하여 필요한 부분을 정확하게 선택해서 부분 선택적으로 연마를 진행하면 비구면이 창성된다. 게다가 연마의 특징에서도 알 수 있듯이, 정확한 측정 수단만 있다면 이러한 부분 연마를 이용해서도 상당히 높은 정도의 비구면을 얻을 수 있다.

또 다른 방법으로 가공한 비구면 형태의 오차를 수정해서 그 정

도를 더 높이는 것도 마찬가지로 가능하다. 단, 부분 연마로 고도의 정도를 가진 비구면을 가공할 경우 단 한번만 가공하여 필요한 정도를 내기란 어렵고, 가공과 형태 측정을 몇 번이나 반복해야지 비로소 목표로 하는 정도에 근공구시킬 수 있는 것이 일반적이다.

2. 부분 연마의 방법

부분 연마에서는 작업면에 비해 크기가 작은 면 접촉 공구를 사용하고, 두 개를 서로 문질러서 가공한다. 연마 감모량은 공구와 재료면의 접촉 압력 및 두 개의 상대적인 마찰 거리에 의해 결정되지만, 상대 마찰 거리는 면 안의 각 점에서 일반적으로 동일하지는 않으며, 또 그 값은 공구 운동 방법에 따라 다르기 때문에 감모 형상은 설정한 연마 조건에 따라 여러 가지 형태를 보이게 된다. 그림 1은 공구를 작업물에 접촉해서 습동(slide)할 때, 공구의 원형 띠 부분이 작업물에 만드는 감모 형상을 보여주고 있다. 고리 형태가 실선 위치(중심A)와 파선 위치(중심B)의 사이를 왕복 습동한다면, 감모로 인해서 생기는 단면 형상은 그림에 검게 나타난 부분이 된다. 바늘 끝 부분은 항상 공구가 접촉하고 있으므로 이 범위에서는 한결같이 감모한다. 이 때 작업물 자체도 C를 중심으로 해서 회전하고 있다면 감모 형상은 C를 중심으로 F에서 보여 주는 것과 같은 형태가 될 것이다. 실제 생기는 감모 형상은 공구면 내의 압력 분포, 공구의 전도 순간이나 동적 관성력의 작용 또는 접촉면내 지립의 분포 등의 영향도 받아서, 단순히 상대 마찰 거리로만 예측한 것과 다른 결과가 된다. 그러나 그렇다 하더라도 같은 조건 하에서 감모 형상의 재현성은 지극히 높기 때문에 단위 시간당 감모 형상을 정확히 구해 두면 그 이후는 시간에 비례해서 깊이 방향의 스케일에 배율을 곱해서 실제의 감모 형상을 거의 정확하게 예측할 수 있다. 부분 연마로 비구면 형상을 창성하기 위해서는 1개 또는 여러 개

의 공구에서 생기는 감모 형상을 종합한 결과가 얻고자 하는 비구면 형상과 합치하도록 공구와 그 운동 조건을 정해 놓는 것이 좋다. 따라서 부분 연마로 비구면을 창성할 때의 문제는 1개의 공구를 사용하든 여러 개의 공구를 사용하든 원하는 형태를 얻기 위해서 가장 상태가 좋은 공구와 가공 조건을 설정하는데 있다. 무엇보다도 공구의 선정이 중요한 것이다.

부분 연마에 사용되는 공구는 크게 다음과 같이 나뉜다.

- 1) 면적비 공구
- 2) 원형 띠 공구
- 3) 포인트 툴

1) 면적비 공구

면적비 공구는 공구의 중심에서부터 반경 위치에 따라 공구가 작업물에 접촉하는 원주 범위가 다르도록 패드(연마 공구의 가공면을 구성하는 부재)를 잘라낸 것이다. 이것을 회전하는 작업물 위에 씌어 적당히 요동을 주어 연마하면, 패드가 전면에 있는 경우와 비교해 부위에 따라 감모량의 차이가 생겨 비구면 형태가 창성된다. 이 방법은 오래 전부터 이용되어 많은 경험이 축적되어 있지만, 일반적으로 단 한번만 패드 형상을 설정해서 이상적인 비구면을 얻기는 어렵고, 가공 도중에 작업물 형상을 측정하여 그 결과에 따른 패드 모양을 반복적으로 수정해서 최종적으로 정도를 조사할 수 있다.

연마에 의한 기본적인 감모량을 어떤 가정(이들테면 Preston의 법칙)에 기초하여 예측할 수 있다면 거기에 기초를 두어 면적비 공구의 잘라낸 형상을 수학적 계산을 통해서도 구할 수 있다. 이러한 연구 결과는 기계적인 비구면 창성 설비를 갖기 어려운 소공장등에서 많이 이용되며, 곡률 반경이 비교적 큰 작업물에 대해서는 유효한 가공 수단이 되고 있다. 그러나 곡률 반경이 작은 것은 공구의 접촉 압력 부위에 따른 차이가 크기 때문에 수학적 결과와 실제 가공 결과는 일치하기 어렵다.

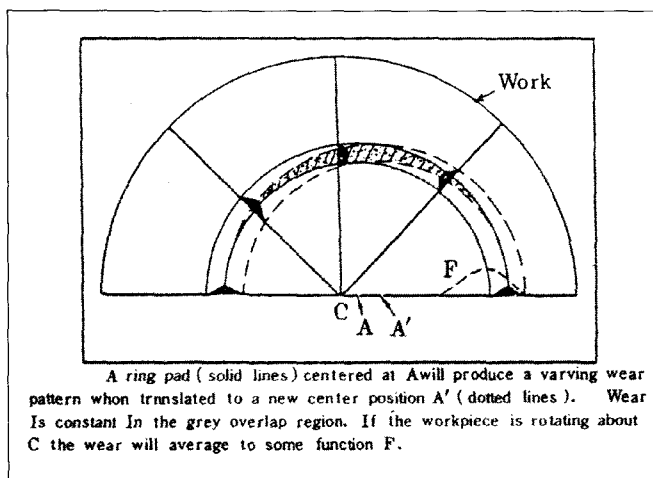


그림 1 연마에 의한 감모 형상

2) 원형 띠 공구

원형 띠 공구는 폭이 좁은 다양한 직경의 링 형태의 공구인데, 이것을 각각 적용 시간도 따로 정해서 선택적으로 사용하여 작업물면 위의 부위에 따라 제거량을 제어하는 것이다. 다시 말해 앞의 면적비 공구가 패드 면적에 따라 제거량을 조절한 것이라면, 원형 띠 공구는 가공 시간으로 조절하는 것이다. 실제로 시간뿐만 아니라 요동 진폭, 하중 등도 각 공구 별로 설정해서 감모 형상을 조절할 수도 있다.

원형 띠 공구의 장점은 각 공구의 기본적인 제거 특성을 실험적으로 확인해 둘 경우 그 공구를 사용하여 다양한 조건 하에서 가공할 경우의 감모 형상을 정확히 예측할 수 있다는 점인데, 그것들을 조합하여 임의의 비구면 형상을 창성할 수 있다. 또 결과가 예측을 빗나간 경우에도 공구의 사용 시간을 바꾸는 것만으로도

다음 수정 연마가 진행되어 면적비 공구와 같이 공구 그 자체를 하나하나 다시 만들 필요는 없다.

한편 이것의 단점은 원형 띠 공구가 어느 정도의 폭을 갖는 이상, 그 감모 형상은 각각 특정한 형상이 되므로, 감모 폭(단면에 서의)과 깊이는 변화시킬 수 있어도 그것들을 중첩해서 목표로 하는 비구면 형상과 합치시킬 수 있다고는 할 수 없다. 또 실제로는 각각의 원형 띠 공구에 의한 감모 형상의 연결 부분에서는 형상이 매끄럽지 않고, 미세한 요철이 있는 형상이 되기 쉽다.

면적비 공구나 원형 띠 공구는 비구면과 접촉해서 요동을 하기 때문에 전체면이 작업물면과 항상 밀착하기 위해서는 공구는 적절한 탄성을 가져야만 한다. 또한 비구면량이 적은 경우, 피치층 자체의 탄성을 이용하는 경우도 있다.

3) 포인트 툴

면적비 공구와 원형 띠 공구의 경우, 공구 중심축의 기본 위치는 작업물 중심이 되고 가공 운동의 한가지 요소로서 반드시 작업물이 회전하게 된다. 즉 가공은 작업물축 대칭 상태에서 이루어진다. 그에 반해 포인트 툴은 중심을 가공면 상의 임의의 위치로 이동시키고, 제거 운동은 주로 공구축 자체의 회전 구동을 통해서 이루어진다. 앞에서 언급한 2가지는 가공 운동의 제어 대상이 되는 것은 요동 폭과 시간 뿐으로, 공구로 가공되는 형상은 한정되지만 포인트 툴에서는 가공 위치도 제어 대상이 되므로 그로 인해 1개의 공구로 임의의 비구면을 창성할 수 있다.

포인트 툴의 가공 방식에서는 작업물을 회전시킬 필요가 없기 때문에, 축 비대칭면(축의 포물면, 반사경 세그먼트 등)을 가공하기에 적합하고, 또한 비대칭에서 생긴 오차의 수정에도 이용할 수 있다. 그러나 반대로 축 대칭 형상을 가공할 때는 작업물의 회전 유무에 상관없이 비 대칭 오차를 일으키기 쉽다.

카메라 등의 렌즈는 비교적 직경이 작아 곡률 반경이 작은 것이 많고, 이에 따라 포인트 툴 자체도 직경이 작아져 공구의 안전성 및 그 밖의 여러 가지 이유때문에 일반적으로 적용하기 어렵다. 또한 능률면에서도 다른 부분 연마법보다는 떨어진다. 그러나 비구면 형상마다 특별한 공구를 제작할 필요가 없기 때문에(작업물 곡률에 맞춘 조제(調製)가 필요한 경우도 있지만, 작업은 간단하다) 일반적인 가공이 가능하고, 또한 극소 부분만을 제거하거나 수정하는데도 편리하기 때문에 소형 비구면 가공 방법으로도 개발되고 있다.

포인트 툴을 컴퓨터로 제어해서 대형 비구면을 가공하는 기술은 미국 등에서 오랫동안 연구되어 왔다. R. Jones의 CCOS (Computer-controlled optical surfacing) 가공기는 연마 패드를 작은 원 형태로 선회시키면서 회전축 위치(X-Y)와 경사각, 높이를 컴퓨터로 제어해서 가공면 위를 이동시키고, 그 이동 속도를 결과적으로는 제거량을 부위에 따라 변화시킴으로써 비구면을 창성한다. 연마 패드는 원형(직경 2in), 정사각형 등이고 그

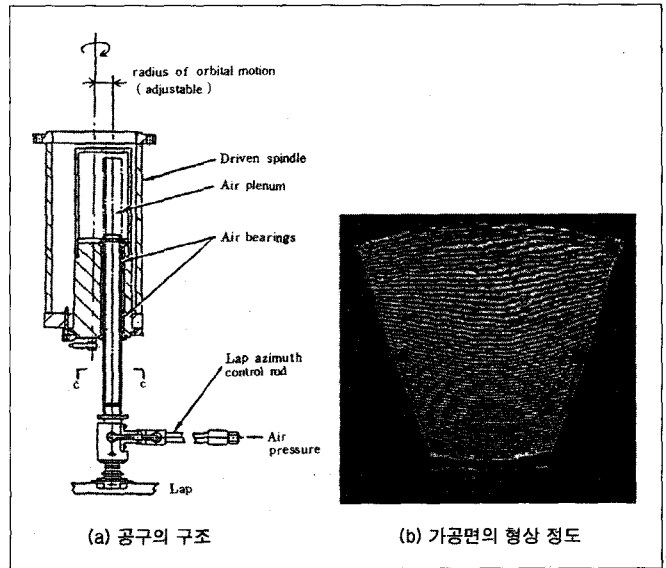


그림 2 포인트 툴에 의한 비구면의 가공

림 2의 공구 장치를 통해서 원주운동이 이루어진다. 실제 가공에 앞서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 패드의 형상, 방향(패드가 원형이 아닌 경우에는 작업물에 대한 자세), 궤적 등을 검토해서 최적의 조건을 결정한다. 최대 부분의 길이가 1m인 비구면경 세그먼트 가공에서, 계산상 도달 가능한 정도는 0.012 μ m rms(고주파 오차 형상을 rms로 표시)였고, 실제로 얻은 결과는 0.04 μ m rms였다. 면의 형상 정도를 나타내는 간섭 무늬($\lambda = 633$ nm)는 그림(b)와 같지만, 이 그림에서 줄 무늬의 곡선은 간섭계의 얼라 인먼트 오차 때문이라고 여겨진다.

카메라 렌즈나 CD 픽업 등의 소형 비구면을 포인트 툴 방식으로 창성 가공하는 시도가 마사키 등에 의해 추진되고 있다. 가공 중, 공구와 작업물이 전부 회전하며 재료 제거는 패드(“툴”)의 정압 절입을 통해서 이루어지는데 그 깊이는 시간으로 제어한다. 경질의 형재 등을 가공할 때에는 면적이 아주 작은 패드인 다이아몬드 펠릿(랩핑용), 폴리우레탄 폴리셔(폴리싱용, 지립으로 다이아몬드 연마제를 공급한다)를 이용하고 있다.

포인트 툴 방식의 가공 성능에 있어서 중요한 문제는 자갈한 요철을 어느 정도까지 수정할 수 있는가 하는 것이다. 공구의 안전성이나 그 운동 조건에 따라 오히려 이러한 오차를 일으키는 경우도 있으므로 주의해야 한다.

원형 띠 공구나 포인트 툴에 있어서, 특히 중요한 문제는 재료 제거 특성의 재현성이다. 이 때문에 가공기의 운동 안전성에는 특히 주의를 기울일 필요가 있으며, 종래의 오스카형 연마기를 사용하는 경우, 주축 베어링을 공기 베어링으로 개조하는 등의 배려를 해야 한다.

또한 공구의 가공 재현성도 문제가 되어, 폴리셔 등을 사용하지 않을 때는 보관 조건에도 주의하여 적시에 가공 특성을 재확인하고 기초 데이터 수정을 하는 것이 바람직하다.

3. 이온 빔을 통한 제거

이온 빔 가공은 이온 가속기로부터 방사된 이온 빔을 유리, 가공 작업물 위에 주사(走査)하여 그 에너지로 재료 원자를 튕겨 소량의 재료를 제거하는 것이다(이와 같은 가공 현상을 스퍼터링이라고 한다).

이것을 이용해서 구면의 비구면화나 비구면 오차 형상을 수정한다. 주사 위치, 제거 두께 모두 높은 분해능으로 제어되기 때문에 가공 정도는 상당히 좋다. 유리면의 이온 빔 조사(照射)를 통한 열 발생은 지극히 적어서, 일반적으로 가공 제거면도 정면으로 유지된다. 한편 시간당 재료 제거율은 매우 작기 때문에(0.1 ~ 1 μm/h 오더) 실용 제품용 생산 가공법으로는 사용되지 않는다.

Schroder 등은 번거로운 수가공에 의존했던 비구면 렌즈의 다

듬질 작업의 합리화를 위하여 이온 빔 가공의 기초 테스트를 실시했다. 그들은 Van de Graff형 가속기를 이용해 0.4 ~ 30μA, 0.5 ~ 1.8MeV의 수소 이온 빔을 발생시켜서 진공도가 6 ~ 8x 10⁻⁶torr인 통 속에서 빔을 주사하여 유리를 가공하였고, 0.03 ~ 1cm²의 면적에서 깊이 1500Å의 재료를 제거했다. Nardony 등은 빔 전류 100μA 로 작업물을 회전 요동시키는 방식을 채택하였으며, 직경 100mm, 비구면량 약 2.5μm의 포물면경을 가공하여 형상 정도 0.025μm를 얻었지만, 가공 시간은 11시간이나 걸렸다. 다니구치, 긴카마 등은 20kV, 1mA 의 알곤 이온 빔 발생기를 개발하여, 비구면 렌즈(BaSF7, 직경 47mm, 곡률 반경 약 44mm) 의 가공 테스트를 실시했다. 조사 시간은 2시간이고, 최대 깊이 약 4μm로 가공되었다.

늘 곁에 있어 소홀하지는 않으십니까?

여기서 잠깐!

‘광학세계’가 산업계, 학계, 연구계의 큰 관심과 기대 속에서 유일한 전문지로 태어난 지가 벌써 15년이 되었습니다. 긴 시간 한결같이 베풀어 주신 지원과 보살핌에 진정으로 감사드립니다. 그동안 ‘광학세계’는 부족하나마 광산업 각 분야별 국내외 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 줄어들어 안타깝습니다. 항상 곁에 있는 것에 소중함을 느끼지 못하듯이, 혹시 너무 오랫동안 쉽게 접할 수 있는 ‘광학세계’였기에 소홀하지는 않으신지요? 독자여러분의 우수료 납부와 질적 향상을 위한 적극적인 참여가 절실합니다.

하나, 우수료 12,000원을 내주세요	둘, 원고 투고를 기다립니다.
‘광학세계’는 1년 우수료 12,000원 외에 따로 책값을 받지 않습니다. 그럼에도 대다수 정기구독자가 우수료조차 납부하지 않는 ‘무료 독자’입니다. ‘광학세계’는 순수하게 광고비로만 발간되고 있습니다. 최근 광고도 급격히 줄어 우수료마저 큰 부담이 되고 있습니다. 우수료 납부에 자발적으로 참여해 주시고, 입금후에는 꼭 연락 주시기 바랍니다. 입금계좌 : 국민은행 084-01-0156-856 예 금 주 : 한국광학기기협회	‘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