

광학소자의 가공 (1)

렌즈 가공의 개념 및 역사

이번 호부터는 광학소자의 가공에 대한 내용으로 '지상 공개 강좌' 코너를 신설, 연재한다. 본 내용은 현재 한국광학기기협회에서 주관하는 한·일 광학산업기술협력사업의 일환으로 일본 연수시 사용되는 교재에서 발췌한 것이다. 본 강좌에서는 우선 렌즈와 프리즘 등에서 이용되고 있는 연삭, 연마를 통한 기초적인 가공방법 및 최신동향에 대해 설명한 후, 최근 들어 특히 중요한 과제로 부각되고 있는 비구면 렌즈, 금속 절삭경 등과 관련있는 기술에 대해서도 순차적으로 설명해 나가도록 하겠다. 이번 호에서는 그 첫번째 시간으로 광학소자의 기초적인 사항인 렌즈 가공의 역사, 특징, 개념 등에 관해 설명한다.

편집자 주

일찍이 '광학 부품'이라고 하면, 카메라나 쌍안경에 사용되는 렌즈나 프리즘이 중심을 이루었으며 카메라, 렌즈 업체에서만 생산이 이루어져 산업계 내에서도 특수한 가공 방법으로 생산되는 특수 부품으로 간주되어 왔다. 하지만 최근 특히 5, 6년 사이에 기술 혁신을 통해 수없이 많은 제품 기술 분야가 창출되었고, 그 중에서도 일반 렌즈나 프리즘 외에도 빛을 매체로 하여 특정한 기능을 지닌 새로운 부품들이 개발되어 실용적으로 사용되게 되었다.

예를 들면, 통신용 광섬유를 비롯하여 광학식 디지털 디스크 장치의 픽업 소자, OA출력 장치의 광 주사용 다면경, 레이저 에너지 장치의 반사경, 파장 선택 필터, 집광 렌즈, 혹은 레이저 발진 소자 그 자체 등 사용 목적에 따라 다양한 종류가 있다.

최근에는 렌즈, 프리즘을 비롯하여 광학적 기능을 갖는 모든 제품을 총칭하여 광학 소자라는 단어가 사용되게 되었다.

다음으로 가공에 대해서 생각해 보면, 예전부터 '광학 부품 가공'이라는 단어는 있었지만 이것은 주로 유리 소재에 기

계적인 제거 가공(이 경우에는 연삭과 연마)을 거쳐 구면, 평면의 형상으로 다듬질하는 가공을 의미하였다. 하지만 지금의 광학 소자에 대해서는 가공 대상이 되는 재료는 유리 이외에도 액정 재료, 플라스틱 재료 등을 포함해서 다양하며, 형상이나 정도면에서도 렌즈나 프리즘과 다른 경우가 많다. 따라서 그러한 가공 원리, 공정내의 처리 방법 등도 소자의 종류에 따라 다양하다. 더욱이 렌즈 자체에 대해서도 플라스틱의 이용, 형상의 비구면화가 추진되고 있으며, 재료 제거법적인 가공 대신에 보다 효율이 높은 열성형 가공의 적용이라는 기술 혁신이 진행되면서 이전과는 완전히 다른 공정이 실현되고 있다.

다시 말해, 광학 소자는 최근에 전자나 광학 관련 기술 및 제품 등 광범위한 범위에서 핵심 부품으로서 중요한 의미를 지니고 있으며 재료, 기능, 형태 또한 매우 다양하다.

그리고 제조면에서도 다양한 가공 원리나 공정 방법이 이용되고 있으며, 그러한 제조 기술의 혁신적인 변화는 매우 빠르다.

다만, 지금도 이전부터 이용되어 왔던 렌즈, 프리즘은 광학 소자 분야 중에서도 하나의 중심을 이루고 있으며, 다양한 광학 소자의 가공 방법 중에서도 유리 렌즈 등의 전통적인 가공법에 기초를 두고 있는 제품이 적지 않다.

1. 렌즈 가공의 역사

렌즈(유리) 가공은 특수한 성격이 있는데, 금속을 바이트로 잘라낼 경우와 같이 재료와 가공 수단이 직결되어 공정이 성립한다고는 볼 수 없다.

여기에 이르기까지는 시행 착오, 조합의 선택 등이 수없이 반복되어 표준적인 가공 방법이 확립된 것으로 생각되지만, 그런 까닭에 렌즈의 가공 역사를 되짚어 보면 생산 기술의 발전 과정에 대한 한 예를 파악할 수 있으며, 또한 가공 기술이 항상 최적화를 위한 방향으로 진행되어 현재 이상적인 방법이나 수준에 도달되어 있는가를 추론해 보는 것도 중요할 것이다.

렌즈가 처음 의도적으로 제작된 것은 기원전으로, 그 방법은 아마 보석을 손질하는 작업 중에 생겨났을 것이며, 용도는 확대경이나 태양광에서 빛을 모으는데 있었다고 한다.

안경이 사료에 등장한 것은 13세기 후반이지만, 그 발명의 발단이나 당시의 제작 방법은 정확하지 않다. 렌즈의 제조법이 처음으로 기록에 나타난 것은 16세기로, 그 이후에 다음과 같은 기록이 남아 있다.

1985년 W. Boune : 가능한 한 투명한 유리를 철의 움푹 패인 홈에 대고 문지르고, 손으로 집은 연마기로 문지른다.

1951년 B. Porta : 유리 조각을 모래와 함께 철로 만든 구형 공구에 문지른다. 다음에 나무 조각에 천을 둘러서 트리폴리 가루(규산 모래)와 물을 묻힌 것으로 가볍게 문지른다. (베니스 안경의 제조법)

1671년 Cherubin d'Orleans : 선반으로 깎아서 만든 철로 된 공구를 추차로 회전시키고 지석(숫돌)을 부셔서 물에 섞은 후 맑은 부분에서 채취한 연마제를 뿌리면서, 철에 달라붙은 렌즈를 문지른다. 다음에 공구에 가죽을 깔고, 주석을 구워서 얻은 가루(산화 주석가루)에 물을 섞어서 렌즈를 닦는다.

1672년 I. Newton : 우선 경면이 되는 합금 재료를 만든다.(Cu:Sn:As 가 6:2:1)

다음에 2장의 동판을 문질러서 요철 구면 공구를 만든다. 반사경재를 볼록 공구에 문질러서 공구의 형상을 경재로 옮긴다. 다음에 볼록 공구에 녹인 피치를 덮고, 이것을 오목 공구에 압착시켜 피치면을 성형하여 폴리셔(연마 공구)로 사용한다.

여기에 물에서 선별한 미세한 산화 규석 가루를 뿌리고, 입으로 호호 불어 습기를 주면서 경재를 소리가 날 때까지 문지른다.

1800년 J. Fraunhofer : 연마된 렌즈면의 형상을 검사하기 위하여, 처음으로 구면원기(뉴턴 원기)를 사용.

1840년 Rosse : 반사경을 연마하기 위하여 증기 기관 구동 연마기를 만들었다.

작업물은 수조 안에서 회전시키고 그 위에 폴리셔가 중력으로 내리 누르면서 크랭크로 왕복 운동한다. 중력과 크랭크 핸들 길이는 조절할 수 있다. 황산철을 달궈서 만든 산화철(Fe₂O₃)가루를 연마제로 사용했다.

이상의 내용은 과학자들이 19세기까지 필요에 의해 정도면에서는 다소 불만족스럽더라도 어쨌든 광학 부품이라는 것을 만들어 온 흔적이기도 하다. 이들 중에 이미 유리 등의 소재를 먼저 ① 딱딱하고 떠있는 지립과 함께 딱딱한 공구로 문지르고, 파쇄를 통한 재료 제거, 형상 성형을 한 후 ② 연마용 지립을 물과 함께 넣어 일종의 부드러운 공구에 문질러서 소재 표면이 광학적인 기능을 갖도록 매끄러움을 준다는 기본적인 가공 공정이 있었음을 알 수 있다.

①이 유리 가공에서의 '래핑' ②가 '폴리싱'이다. 지금까지의 유리 렌즈, 프리즘 가공에서도 기본적으로는 위와 같은 래핑, 폴리싱 등의 방법이 채택되어 왔다. 단 최근 안경, 카메라용 렌즈 등의 양산의 경우 특히 다이아몬드 고정 지립의 이용, 새로운 공구재, 연마제^{*)}의 도입 등에 따라 종래의 기본 공정은 개선되어가고 있다. 이와 동시에 가공 운동 개선, 고속화 및 기타 공정 방법에서의 새로운 고안 등이 실현되어 가공 시간의 단축, 도달 정도의 향상, 숙련 작업의 불필요화 등이 가능해지고 있다.

2. 렌즈 가공의 특징

렌즈 가공에는 일반 금속 기계 부품의 가공과는 상이한 점이 몇 가지 있다. 이 중 중요한 것은 필요로 하는 정도가 높다는 것과 유리라는 재료의 가공 성질이다.

종래에는 이런 2가지가 렌즈 가공 방법을 규정해 왔다고 생각되므로 우선 이것에 대해 설명하고자 한다.

a) 렌즈의 정도(精度)

렌즈, 프리즘 등 면 가공에서 실현되어야 할 최종적인 품질 조건은 '면형상의 정도'와 '표면의 매끄러움'이다.

여기서 구면 렌즈의 경우를 예로 들자면, 면형상의 정도는 곡률 반경의 정확성과 진구(眞球)의 정확성(다시 말해 곡률 반경의 일정함)으로 성립된다고 할 수 있다. 측정은 일반적으로 가공면과 기준 원기(뉴턴 게이지 원기)면이 서로 겹쳐지도록 하던가 간섭계 참조파와 가공면 반사파 간에 간섭을 일으켜 발생하는 간섭 무늬로 측정한다.

*) 렌즈 등의 면을 폴리싱으로 광학 경면화시킬 때 사용하는 지립, 혹은 그 슬러리를 '연마제'라고 칭한다

▶▶▶ 지상 공개 강좌

간섭 무늬는 기준에 대한 이른바 오차의 등고선을 나타내고, 무늬 1개당 사용 파장 λ 의 1/2, 다시 말해 약 $0.3\mu\text{m}$ 의 형상이라는 말이 된다. 설계상의 정도 지정에 있어서 일반적으로는 이 방법이 사용되며, 렌즈의 용도에 따라서 표 1과 같은 경우가 많다.

한편, 가공면의 매끄러움의 경우, 광학 부품의 표면은 광선을 올바르게 반사·굴절시키고, 산란도 약간 억제시킬 수 있도록 어느 정도 이상 평평해야 한다.

이러한 면을 광학 경면이라고 부르는데 그 상태를 정량화하여 표현하는 것은 어렵다.

표 1. 렌즈에 요구되는 면 정도

렌즈의 용도	뉴턴 무늬 라인 수		
	립	아스	굴곡
반도체 노광용 광학계			
천문, 우주 관측용 광학계	0.5라인	0.1 라인	0.1 라인
항공 카메라			
사진, TV촬영계	3	1	1
레이저 광학계			
뷰 파인더	1~5	1	1
측정 기기 일반 광학계			
콘덴서			
루페	15	5	5
안경			

(주의 : 이 치수는 참고치로, 실제로는 각각의 설계 사양에 따른다.)

이전부터 일반 렌즈, 프리즘에 관해서는 부품 사양으로서 표면의 매끄러움에 대해 특별히 지정하지 않으며, 단지 '연마면'이라고만 표시되어 육안 확인을 통하여 경면화 가공의 합격·불합격이 판정되어 왔다.

하지만 정밀 광학계나 고출력 레이저 광학계 부품 등 용도에 따라서는 표면의 매끄러움이 특별히 중요한 부품도 최근 들어 많아지고 있으며, 그러한 경우에는 표면 검사 방법과 매끄러움이 지정되어 있어, 지정값에 도달할 수 있는 폴리싱 방법을 선택할 필요가 생겼다.

b) 유리의 가공 특성

c) 유리는 일반적으로 경취(硬脆) 재료라고 불리며, 딱딱하면서 매끄러운 재료로 알려져 있다. 유리는 선단 강도에 비해 인장 강도가 현저히 떨어지며(전자의 약 1/10), 경도가 높다. 특히 비정질이므로 결정 재료와 같은 이방성은 없고, 파괴 시에도 벽개성을 나타내는 경우도 없다. 유리의 이러한 성질은 가공시의 재료 파괴 거동에서 금속과는 결정적으로 다른 양상을 보여준다.

재료에 선단 구면상의 압자를 압착시켰을 때 유리와 금속

재료의 상태를 보면, 금속의 경우에는 압자의 하중이 증가하여 접촉 응력이 어느 한계치를 넘었을 때 소성 변형으로 인해, 영구 변형을 가져온다.

하지만 유리의 경우에는 압자에 하중이 가해지면 재료 내의 깊이 방향을 향해 인장 응력 최대의 면이 생기게 되고, 그 응력이 임계치를 넘었을 때 거기에서 인장 파괴가 일어나 결과적으로 갈라진다. 균열 형상은 압자 선단의 곡률 반경 크기에 따라 원추형, 세로 홈 방사형 등으로 나뉜다. 원추형으로 갈라진 경우에는 압착으로 인해 갈라진 원추가 일정 정도 커진 후 압자를 갑자기 제거하면 원추 환상부가 부서져서 이탈하는 현상이 나타난다. 이것은 탄성으로 인해 변형됐던 재료 부분이 갑자기 원 상태로 돌아갔기 때문에 갈라진 틈새 사이의 공기나 미세 조각으로 인해 환상부가 밀려 그 어깨 부위가 꺾이기 때문으로 생각된다.

실제 가공에서는 공구나 지립은 재료에 압착될 뿐만 아니라 압착되어 파고 들어간 상태에서 재료면을 따라 움직임을 줄 수 있다. 이 경우 금속에서는 바이트의 선단으로 밀어 올려 짐으로써, 재료 내에 선단 응력 최대 부분이 생긴 결과가 지속됨에 따라 재료의 변형 파괴가 진행된다.

이것으로 금속 부스러기가 생기고, 거시적으로 볼 때 매끄러운 가공면을 얻을 수 있게 된다.

한편, 유리의 경우에는 바이트 대신에 지립을 압착시키고 이것을 그대로 옆으로 밀어내는 경우에 대해 생각해 보면, 지립이 고정형일 경우에는 뒤쪽에 인장 응력이 추가되어 생기며, 또한 하나 하나의 지립이 자유롭게 움직일 수 있다고 한다면 지립의 앞쪽에 부가적으로 인장 응력이 생겨 이것들이 압입으로 생긴 효과와 더불어 응력 최대가 된 시점에 인장 파괴를 일으켜 우리가 파쇄된다.

한편, 주의해야 하는 것은 파쇄로 인해서 형성된 재료의 표면 밑에는 파괴까지는 이르지 못한 수많은 균열이 남는 경우가 있다. 균열의 깊이는 지립 선단의 형상(곡률 반경) 및 압착력의 크기에 따라서 결정된다.

다음에 유리에 광학 경면을 창성시키는 가공 원리에 대해서도 설명하도록 하겠다.

유리를 광학 경면으로 가공하기 위해서는 일반적으로 일종의 유연성을 가진 폴리셔(연마용 공구)에 연마제 슬러리를 첨가하면서 문지르는, 이른바 폴리싱을 실시한다.

폴리싱에 의해 유리면이 매끄러워지는(R_{max} 로 $10\sim 100\text{\AA}$) 원리에 대해서는 금세기 초반부터 여러 가지 학설이 제창되어 왔다.

이러한 학설을 크게 보면 (A) 미세 제거설 (B) 유동설 (C) 화학 작용설로 나눌 수 있다.

미세 제거설은 Rayleigh가 최초로 주장한 것으로, 하나 하나의 지립이 재료를 제거 가공한다는 점에서는 래핑과 동일

하지만, 연질의 문지르기 공구를 사용하므로 미세한 다량의 지립이 가공면에 동시에 작용하기 때문에 지립 1개 당 부하 하중은 작아지고, 재료 제거가 분자 오더로 진행되어 매끄러워진다고 한다.

유동설은 Beilby가 주창한 것으로, 지립 작용으로 유리 표면이 유동하고, 재료의 낮은 부분이 매워져서 평평해진다는 것이다. 이렇게 매워진 층을 Beilby층이라고 한다.

화학 작용설은 Grebenschikov가 처음으로 제창하였다. 폴리싱에서는 슬러리의 물 작용으로 인해 유리 표면에 젤 상태의 규산수화물이 생기고, 이 돌기 부분을 문질러서 제거하면 자연스럽게 평활면이 된다고 한다.

정리하면 폴리싱에서는 이러한 모든 원리가 서로 공존하여 유리의 매끄러운 경면을 얻을 수 있게 된다고 할 수 있을 것이다. 단, 각각의 효과에 대해서는 연마되는 유리의 종류, 지립, 공구 재료, 연마액, 가공운동, 온도 등 다양한 조건에 따라 변화한다고 할 수 있다.

3. 렌즈 가공의 개념

단일 렌즈는 광학 유리와 같이 광학적으로 균일하고 투명도가 좋은 물질-광학재료-로 만들어지며, 2개의 매끄러운 곡면을 가진다.

이 면은 구면 또는 평면이지만 최근에는 2차 곡면 등 구면 외의 곡면도 있는데, 이 경우 비구면 렌즈라고 부른다.

2개의 곡률 반경, 각 면간 거리(중심 두께), 광학 재료의 굴절률을 렌즈 설계 상의 3요소라고 한다.

유리 렌즈 가공은 소재를 우선, 가능한 한 재료 제거 능률이 높은 방법으로 렌즈 형상으로 다듬질한 다음에 다듬질 공정에서 생긴 가공층(균열층)을 제거, 마지막으로 경면화 가공을 하는 것이다.

제1 공정을 '러핑(roughing)', 다음을 '스무딩(smoothing)', 마지막을 '연마(polishing)' 라고 부른다.

유리는 경취 재료이므로 러핑에는 효율이 좋은 파쇄 가공, 즉 균열 발생을 동반하는 가공 방법이 적당하지만, 균열은 연마 공정 종료 시까지는 완전하게 제거해야만 한다.

그렇게 하기 위해서 실시하는 것이 스무딩으로, 이것도 기본적으로는 파쇄 가공이지만 단계적으로 표면의 거칠기를 다듬어가는 공정이다.

파쇄 가공은 재료의 경취성을 이용하는 것이므로, 그 능력을 향상시키기 위해서는 지립 1개당 가해지는 하중을 높인 후 파괴 응력 임계점이 재료의 심부까지 전달되도록 할 필요가 있다. 그렇게 하기 위해서는 거친 지립과 딱딱한 래핑 공구를 이용하는 것이 좋다. 단, 그렇게 하면 재료 이탈 단

위는 커지고, 다시 말해 표면 거칠기는 거칠어지고, 가공면 밑에 잔존하는 균열도 깊어지므로 다음 스무딩에서는 그 깊이에 따라 두꺼운 재료 제거가 필요해진다.

지립 가공의 표면 거칠기를 작게 하기 위해서는 선단의 작은 지립을 이용하며, 거기에 가해지는 가공 하중을 작게 하면 좋다. 그렇게 하기 위해서는 미세한 지립을 사용하여 수많은 지립에 하중이 분포되도록 한 후, 어느 정도의 탄성을 가진 래핑 공구를 사용하여 지립에 과대한 하중이 걸리지 않도록 할 필요가 있다.

최근 스무딩에 사용되고 있는 펠릿(다이아몬드 미세분말 고정 지립 공구)의 다듬질 단계에 있는 것은 이러한 사실에 기초하여 만들어지고 있으며, 공구 하중으로 인해 지립이 재료에 주는 응력은 임계 파괴점에 도달하지 않고, 오로지 소성 유동적인 가공이라는 것을 목표로 삼고 있다.

현재, 공정의 목표를 전체 가공 시간의 최소화에 둔다면, 이것의 결정 요인은 각 공정의 재료 제거 속도, 해당 공정으로 얻을 수 있는 표면 거칠기 및 도달할 수 있는 형상 정도일 것이다.

단순화하기 위해, 도달 형상의 정도는 조건에서 제외하고 각 공정에서는 전공정의 표면 거칠기에 해당하는 두께 만큼의 재료를 제거할 필요(실제 공정에서는 전공정의 표면에 대한 최대 거칠기의 10배정도의 두께를 제거하지만)가 있다면, 전체 가공 시간 T는 다음과 같은 식을 통해서 구할 수가 있다.

$$T = t_r + t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n$$

$$= \frac{E}{r_r} + \frac{S_r}{r_1} + \frac{S_1}{r_2} + \frac{S_2}{r_3} + \dots + \frac{S_n}{r_r}$$

단, t 는 각 행정의 가공 소요 시간, E 는 러핑 가공 여유(=소재형상오차), S 는 표면 거칠기, r 은 가공 속도(제거 능력), 첨자는 R 이 러핑, $1, 2, 3, \dots, n$ 이 스무딩 각 공정, P 가 연마를 나타낸다.

당연한 일이지만, 최초 러핑에 필요한 가공 여유 E 및 각 공정의 표면 거칠기 S 를 작게 하고, 제거 능력 r 을 크게 하면 전체 가공 시간 T 는 작아진다. 하지만 파쇄 가공 공정에서는 앞에서 설명한대로 제거 능력을 높이는 방법을 선택하면 표면 거칠기는 필연적으로 커지고, 반대로 하면 작아진다. 때문에 일련의 공정을 어떻게 조합해서 설정하는가에 대해서 다양한 방법을 생각할 수 있으며, 그에 따라 가공 시간 T 가 결정된다.

<다음호에는 '유리 렌즈의 가공 공정'을 소개하겠다.>