

광학소자의 가공

유리 렌즈의 가공 공정(1)

지난 호에 이어 두 번째 시간으로 이번 호에서는 글라스 렌즈의 가공공정에 대해서 알아보겠다. 글라스 렌즈의 가공 공정은 소재고르기에서부터 러핑(roughing), 스무딩(smoothing), 연마(polishing), 센터링과 예징 등을 거치는데 분량이 방대한 관계로 연마와 센터링, 예징에 대해서는 다음 호에 이어 게재하도록 하겠다.

편집자 주

표준적인 렌즈 가공 공정을 말하자면 소재 고르기와 면가공(조가공, 스무딩, 연마), 외경가공(편심 제거) 등이 있는데 이들 각 공정에서 목표하는 바는 아래에 설명해 보았다.

- 소재 고르기는 렌즈 1개 분량의 재료를 조성형해서 가공소재를 만드는 공정을 말한다.
- 조가공에서는 소재의 치수를 렌즈의 최종값에 근접시켜서 표면 거칠기를 개선하는 공정을 말한다.
- 스무딩은 마름질, 연삭으로 생긴 표면의 거칠기를 보다 미세화시키고 두께 치수를 필요한 정도 내에 들게 하는 공정이다.
- 연마는 렌즈면을 광학경면으로 다듬질함과 동시에 치수와 형상을 최종 정도 내에 들게 하는 공정을 말한다.
- 편심제거는 광축과 렌즈의 중심축을 일치시켜 소정의 렌즈 직경으로 만들기 위한 외경 가공을 말한다.

일반적으로 여기에 렌즈면에 대한 무반사 처리 및 외경 코팅 처리를 하여 하나의 렌즈가 완성된다.

한편, 본 고에서는 두세 가지 용어의 의미를 정하도록 하겠다. 지석, 다시 말해 본드 등으로 결합한 고정 지립을 사용해서 처리하는 공정을 '연삭' 이라고 한다. 지립을 물에 섞어서, 다시 말해 떠있는 지립 상태에서 공구로 문지르면서 하는 가공을 '연마' 라고 한다.

연마 중 유리 표면을 파쇄해 가는 공정을 '래핑', 연마를 내는 공정을 '폴리싱' 이라고 한다.

다음에 각 공정에 대해 설명하고자 한다.

1. 소재 고르기

광학 유리의 재료는 200종류 이상이다. 이것은 광학 유리 메이커 등에서 제조되며, 블록재(각형재), 프레스재 등의 형태로 렌즈 메이커에 제공된다. 따라서 이 이후의 공정은 렌즈를 만드는 쪽에서 하게 되는 것이다.

렌즈의 생산 개수가 적을 경우, 또는 특수한 유리 재료일 경우에

▶▶▶ 지상 공개 강좌

표1 광학 유리 절단용 다이아몬드 지석의 규격 (DIN)

형상	외경 (mm)	홀 직경 (mm)	D층 두께 (mm)	D층 폭 (mm)	대금(합금) 폭(mm)	D지석의 입도
연속날	100	} 16	} 5.10	0.6	0.4	} D 70~D150
	125					
	160					
	200	} 22		0.8	0.6	
	250			0.9	0.7	
	300	} 32		1.2	0.9	
350	1.5		1.2			
분할날	400	40	5	1.8	1.5	D150~D250
	300	} 32	5.10	1.5	1.2	D150~D250
	350					
	400	} 40	5	1.8	1.5	D250
	450					
500						

표 2 렌즈 소재의 치수 공차

외경 구분	RP		DP		평형상 절단품	
	중심 두께	외경	중심 두께	외경	두께	외경
4~20	-	-	-	-	0.15	0.015
18 이하	0.5	0.1	0.30	0.08	-	-
18~30	0.4	0.15	0.25	0.10	-	-
30~50	0.4	0.20	0.25	0.13	-	-
50~100	0.3	0.30	0.30	0.15	-	-
100~150	0.3	0.40	-	-	-	-
150 이상	0.4	0.50	-	-	-	-

는 블록재를 재료로 하고, 유리용 절단기, 원통 연삭반으로 원판형 소재로 가공한다. 유리 절단에 사용되는 다이아몬드 지석(숫돌)으로는 연속날과 분할날이 있으며 독일공업규격(DIN)에서는 표 1과 같이 지정하고 있다.

유리 외경의 원통 연삭에는 다양한 방법이 있지만 컵 모양 지석을 사용하는 3차원 원통 연삭반은 높은 효율을 얻을 수 있다.

이 경우, 먼저 양면 가공한 소재를 접착해서 봉 모양으로 만든 후, 한꺼번에 외경 가공을 할 수 있다. 소재의 양면은 평면 연삭반으로 절단하든지 주철의 회전 원판 위에다 지립과 물을 뿌려서 여기에 유리 면을 문질러서 평면을 만들거나, 치수를 결정한다. 이와 같은 방법으로 만들어진 원판 형상의 소재를 '소절단·원기둥 모양깎기' 라고 부른다.

생산량이 많을 경우에는 불필요한 가공을 생략하기 위하여 유리를 열 프레스로 성형해서 소재를 만든다. 프레스재의 제조법으로는 소정 중량의 유리 조각을 가열(700 - 800℃) 연화시켜 금형으로 프레스하는 재가열 프레스(RP)와, 용융 상태인 유리의 일정량을 직접 금형에 주입하여 프레스 성형 (DP)하는 것이 있

지만, 어떤 경우에도 금형 내에서 냉각되어 고정될 때까지의 수축력으로 인해 어느 정도의 치수상 편차가 일어나는 것을 피할 수 없으며, 표 2와 같이 가공 공차가 설정되어 있다. 따라서 소재의 호칭 두께 치수는 렌즈 치수에 이러한 편차를 생각해서 정할 필요가 있으며, 결과적으로 렌즈의 최종 두께+2mm, 때로는 그 이상으로 하지 않으면 안 된다.

2. 러핑 (roughing)

소절단·원기둥 모양깎기이든 프레스 소재이든, 표면 상태 및 치수의 정도면에서 볼 때 그 상태에서는 다음의 스무딩 공정으로 갈 수 없다. 때문에 우선 표면 거칠기를 다소 희생하더라도, 성형 능률이 높은 방법으로 가공하여 소재를 최종 렌즈 치수에 근공구키고, 표면 상태를 모두 동일화한다.

이것이 러핑으로 그 공정은 러핑(roughing) 또는 연삭을 통해서 이루어진다.

러핑(roughing)은 전통적인 방법에서는 회전하는 주철 공구^{주)}에 지립과 물을 뿌리고, 여기에 소재를 손가락 등으로 눌러서 그 표면을 마모시킨 후, 공구의 형상을 소재로 이동하는 방법을 이용하였다.

지립으로는 A지립 (산화 알루미늄이 주성분인 지립), C지립(탄화 규소가 주성분인 지립)^{가)}에 물을 넣어서 사용하였고, 작업을 여러 단계로 나눠서 거친 지립 #120 정도에서 미세 지립 #600 정도까지 순차적으로 가공면의 거칠기를 조절해 갔다(다시 말해, 실제로는 스무딩 작용까지 포함). 지립의 입도 분포는 표 3과 같이 정해져 있다.

지립 직경의 선택 기준으로써 전단계 입경의 1/2인 것을 선택한다는 것은 상식으로 알려져 있다. 또한 가공 층의 깊이 F는 사용 지립 직경 D에 대해서 $F \approx 0.7$ 정도가 된다고 알려져 있다^{나)}.

러핑(roughing)에 사용하는 공구 및 가공한 렌즈의 곡률 반경 검사에는 R게이지(템플릿 형) 또는 간이식 링 곡률계가 사용된다.

오늘날 대부분의 생산 공정에서는 러핑 방법으로 보다 효율이 높은 다이아몬드 연삭이 이루어지고 있다. 회전 지석은 지립이 강하게 유지되어 깊게 절입되며, 지립의 작용 속도도 고속화시킬 수 있기 때문에 랩핑과 비교해 볼 때 훨씬 높은 가공 효율을 얻을 수 있다. 특히 지립으로 다이아몬드를 사용하면 지립 수명은 길어지고, 엄청난 연삭력에도 견디기 때문에 가공 효율이 월등히 향상된다.

지석은 입경이 일정한 여러 개의 다이아몬드 입자를 각종 본드 재료로 고정시킨 것으로, 본드가 강할수록 다이아몬드 입자의 유지력은 증가하여 제거 능력이 높아진다.

본드재의 종류로는 KN 도금을 이용한 전착 본드, 세라믹 등의 무기질로 고정시킨 비트리화이드 본드, 금속의 미세 분말을 프레스하여 소결한 메탈 본드, 페놀 수지 등으로 고정시킨 레진 본드가 있고, 동일한 입경을 가진 입자라면 앞에서 열거한 내용 중 뒤로 갈수록 본드가 단단하고 가공 표면의 거칠기 또한 좋다.

연질 본드의 경우 표면 거칠기가 좋은 이유는 가공물에 지석을 압착했을 때 돌출한 입자가 침하해서 입자 선단의 위치가 정리되기 쉬워지고, 각각 작용하는 지립의 절입 깊이가 균등해지기 때문에 깊은 균열이 잘 생기지 않을 것으로 생각된다.

지석 직경 D와 지석축 경사각의 산출 방법에 따라 창성 반경R을 정할 수 있다. 이러한 방법에 의한 렌즈 구면 연삭반을 커브 제너레이터(Curve Generator)라고 부르며 이 공정을 'CG 가공'이라고 부른다.

CG 가공의 공구는 메탈 본드(철강계 또는 브론즈계 등)일 때는 전착 다이아몬드 지석(D지석)이다. 일반적으로 사용되는 다이아

표3 JIS (R6001)에 의한 지립 입도 분포

입 도	(a)고운가루		
	최대 입자의 평균 직경	최대 입자에서 30번째 입자의 평균 직경	평균 직경의 평균
#240	171 이하	120 이하	87.5 ~ 73.5
#280	147 이하	101 이하	73.5 ~ 62
#320	126 이하	85 이하	62 ~ 52.5
#360	108 이하	71 이하	52.5 ~ 44
#400	92 이하	60 이하	44 ~ 37
0			
#500	80 이하	52 이하	37 ~ 31
#600	70 이하	45 이하	31 ~ 26
#700	61 이하	39 이하	26 ~ 22
#800	53 이하	34 이하	22 ~ 18
#1000	44 이하	29 이하	18 ~ 14.5
#1200	37 이하	24 이하	14.5 ~ 11.5
#1500	31 이하	20 이하	11.5 ~ 8.9
#2000	26 이하	17 이하	8.9 ~ 7.1
#2500	22 이하	14 이하	7.1 ~ 5.9
#3000	19 이하	12 이하	5.9 ~ 4.7

몬드 입도는 #170~#600이다.

도달 가능한 표면 거칠기는 가공 조건의 영향이 크지만 대략 5~10 μ m Rmax이다.

일반적으로 커브 제너레이터에서는 렌즈를 동일 곡률면에 여러 개 접촉시킨 것을 한꺼번에 가공할 수 있으며 그 때의 가공 시간은 1~3분 정도이고, 1개당 가공 시간은 기존의 러핑(roughing)과 비교해 볼 때 현저하게 단축된다.

3. 스무딩(smoothing)

이 공정은 러핑(roughing)이나 연삭에서 생긴 깊은 균열층을 제거하여 표면의 거칠기가 한층 더 미세해지도록 만드는 것이다. 그 다음 공정에 연마 공정이 있지만 연마 재료 제거 능력은 낮고, 렌즈의 두께 치수를 지정하거나 형상의 오차를 큰 범위 내에서 수정하는 것은 불가능하므로 최종적인 치수 결정, 형상 결정도 스무딩으로 해야만 한다.

스무딩에는 연마제로 갈기, 최근의 양산 공정에서의 정연삭 방법이 사용된다.

연마제로 갈기는 러핑(roughing)과 마찬가지로 곡률을 가한 주철제 공구와 렌즈재를 지립과 물을 섞고 서로 문질러서 운동시키면서, 렌즈를 공구 형상으로 다듬질하는 것이다. 이 때 연마제

주) 일본에서는 유리 가공에서의 곡률형 공구를 '점시(點錐)'라고 하는데 여기에서는 공구로, 랩핑에 이용하는 지립을 '모래(沙)'라고 부르는데 여기에서는 연마제로 번역했다.

2) 이마나카 외 '비금속 재료의 정밀 가공법(F)' (1964), 지인 서관

▶▶▶ 지상 공개 강좌

로 갈기와 함께 사용되는 렌즈재는 이미 앞 공정에서 그 기본 형상이 정해져 있으므로, 공구에 구속받지 않고 자유 압력으로 절입하면 공구의 형상이 올바르게 렌즈로 옮겨진다.

연마제로 갈기에서의 공구와 렌즈의 운동은 예전부터 횡진 방식을 사용해 왔다.

한편 최근에는 가공의 고속화, 공구 궤적의 개선을 목표로 각종 운동 원리의 연마기도 등장하여 널리 사용되고 있다.

어떠한 경우에도 이 공정의 기본적인 목적은 1차 연마 공구의 형상을 렌즈에 옮기는 것으로, 공구 자체가 가공 도중 절대로 변하지 않는다고 할 수 없으며, 연마제층이 끼어 들거나 공구류에 작용하는 관성력과 전도 모멘트 등도 가공 형상에 영향을 미치므로, 조건 설정에는 충분한 주의가 필요하다^{*)}.

일반적으로 스무딩 이후의 공정에서는 여러 개의 렌즈를 1개의 접착 공구에, 각 렌즈의 가공면이 한 개의 구면상에 나열되도록 접착하여, 전체를 동시에 구면 가공한다. 목적은 효율 향상과 함께 렌즈 형상(곡률 반경과 직경의 관계)에 따라서는 이런 방법이 연마 공정에서 면의 정도(精度)를 얻기 쉽다는 것에 있다^{*)}.

이러한 접착 방법을 '다수 접착'이라고 칭한다. 옛날부터 일반적으로 사용되고 있는 방법은 렌즈는 평평한 접착 수지(피치, 송진, 석고 등을 섞어서 만드는 접착성이 있는 열가소재)를 이용하여 접착 공구인 '수지 접착 공구'에 접착시킨다.

1차 연마에 보통 사용되는 지립은 알루미늄계 A지립 또는 탄화규소계의 C지립으로 최초 #600(평균 입경 28 μ m)에서 #1000~#2000(평균 입경 8 μ m)와 같이 대개 2단계 정도로 나눠서 진행하며, 점진적으로 표면 거칠기를 미세화한다.

입도 한계가 존재하는 이유는 지립에 압착되는 힘을 이용해서 실시하는 랩핑 가공의 경우, 지립 직경이 작으면 압입 깊이가 얇아서 재료 국부에 탄성 변형 또는 소성 변형이 생기는 일은 있어도 파괴에 필요한 한계 응력의 발생까지는 도달하지 않기 때문이라고 생각된다. 1차 연마가 가능한 입도 한계는 반드시 유리의 높은 마이크로 비커스 경도(Hv)로 결정된다고는 할 수 없다.

현재, 대부분의 양산 공정에서는 연마제로 갈기 대신에 다이아몬드 펠릿이라는 정연삭 지석으로 스무딩을 하고 있다. 이것은 다이아몬드 지립을 본드로 결합한 작은 원판상(t 3~5mm, ϕ ~20mm 정도)의 펠릿 지석을 알루미늄계 등의 공구에 접착, 렌즈 가공면과 동일한 곡률로 면 내기를 한 것을 공구로 하여, 물이나 연삭액을 뿌리면서 렌즈면을 문질러 연삭하는 것이다. 이 방식을 'D펠릿 가공'이라고 부른다. 정연삭은 가공 원리로 볼 때 일종의 호닝이라고 볼 수 있다.

D펠릿으로 가공한 유리 가공면은 랩핑과 같은 파쇄면이 되는 경우도 있지만 딱딱한 유리일 경우에는 굽힌 흠집의 집성면이 되

기도 한다.

또한 지립의 선단을 내기 위해서 드래싱 한 D 펠릿의 유리 제거 능력은 사용시간이 지남에 따라 약해져 지석 알갱이가 손상되거나 가공 중 셀프 드래싱이 균형을 잡으면서 가공이 진행되어 감을 알 수 있다.

하지만 양산일 경우에는 일정한 거칠기를 지닌 유리 블랭크와 지석이 반복적으로 서로 대응하면서 그때마다 초기 드래싱이 실시되므로, 외형적으로는 안정된 유리 제거 성능을 유지할 수 있다. D펠릿 정연삭의 가공 능력은 가공 조건에 따라 크게 변하지만, 가공 시간은 1차 연마와 비교해서 대략 1/2에서 1/5까지 단축된다. 여기에는 공구축 속도의 고속화(주축 속도: 1차 연마 200~300rpm 이하, D펠릿 가공 1000rpm 이상), 가공 압력의 증가(연마제로 갈기 100gf/cm², D 펠릿 가공 gf/cm² 등) 등 가공 조건 향상에도 효과가 크다.

D 펠릿 가공의 또 한가지 효과는 미세한 표면 거칠기를 얻을 수 있다는 데 있다.

입도 #1500 메탈 본드 펠릿으로 0.5 μ m Rmax, 유리 종류에 따라 다르지만 레진 본드 펠릿을 사용하면 0.1 μ m Rmax를 얻을 수 있다. 레진 본드는 그 탄성에 의해 지립의 돌출 높이가 미세화되고 평준화되어 보다 얇게 가공면에 작용될 수 있기 때문이라고 생각된다.

D 펠릿 가공에서는 떠있는 지립을 사용하지 않으므로 슬러리 관리가 필요없고, 장치와 작업물의 청소, 세정 처리도 간편해져 공정 자동화 시 유리하다. 가공기는 1차 연마 기계와 동일한 기계를 사용해도 좋지만, 현재로서는 운동 방식, 속도, 가압력, 조작성 등을 근본적으로 개량하여 전문화된 기계가 여러 개 시판되어 이용되고 있다.

<다음 호에는 유리렌즈의 가공공정중 연마, 센터링과 예칭 공정을 소개하겠다.>

삼원문화인쇄

서울시 중구 을지로3가 322-1

TEL : (02)2268-7135 FAX : (02)2269-3068

카다록, 브로슈어, 포스터, Box,
정기간행물, 보고서제작

*) 특별히 '1차 연마기'라고 부르는 경우도 있지만, 이런 종류의 기계는 일반적으로 1차 연마나 2차 연마에 모두 사용 가능하므로 통칭하여 '연마기'라는 단어를 사용하는 경우가 많다.

*) 자동화 공정일 경우에는, 작업을 유지 및 핸들링 면에서 1개를 가공하는 것이 손쉬우며, 후공정까지 모두 1개씩 별도의 공정 방식을 채택하는 경우가 대부분이다.