

광학부품 제조 공정 및 각 공정별 주의사항 ①

대우고등기술연구원 이수상 책임연구원이 '광학세계' 독자들을 위해서 광학부품 제조의 전 과정, 가공별 특징, 공정별 주의사항을 정리한 내용이다. 지난 6월 28일 열린 '99 광기술교육' (인하대학교 광기술교육센터 주최)에서 강의한 '정밀광학부품의 제작' 가운데 현장에서 필요한 '가공 공정' 부분을 쉽게 이해하고 활용할 수 있도록 이수상 연구원이 다시 설명을 덧붙였다. 이번 호에 이어서 11월호까지 2회에 나눠서 연재한다.

글: 이수상 책임연구원/대우고등기술연구원

I. 서론

Prism과 lens류로 대별되는 광학부품의 제조 공정은 정밀기계 부품류에 비하여 간단하고 광학 부품의 제조 공정이라 하면 단지 lapping과 polishing이 주종을 이룬다고 생각한다. 이와 같은 통상적인 관념은 저급 광학부품의 제작에서는 일면 일리가 있는 것처럼 보이지만 정밀 광학부품의 제작에서는 상당히 잘못된 생각이다. 이와 같은 인식은 광학부품의 특성 즉, 소재나 제조 공정의 메카니즘에 대한 이해의 부족에서 기인되는 것으로 생각된다.

정밀 광학부품을 효율적으로 제작하기 위해서는 소재의 특성, 가공 메카니즘과 원리, 각종 치공구의 특성, 광학부품의 세척의 원리 및 특성, 그리고 평가 방법 등 여러 요인들에 관한 이해가 필수적이다.

Optical glass는 대표적인 경취(經脆)재료 즉, 딱딱하고 깨지기 쉬운 재료이기 때문에 가공이 아주 어렵다. 통계적으로 보면 경취 재료인 glass나 ceramic 제품가격의 약 70%가 가공비에 해당된다고 한다. 그러므로 경쟁력 있는 광학부품의 생산을 위해서는 제품가격의 약 70%를 차지하는 가공을 '어떻게 효율적으로 수행하는가'이다.

본 고에서는 정밀 광학부품을 효율적으로 가공하는 데 미력하나마 도움을 주기 위하여 광학부품의 전 process, 각 process별 특징, 그리고 각 process별 주의 사항 등에 관해서 기술한다.

II. 일반적인 광학부품의 제조 공정

가장 간단한 광학부품인 렌즈를 예로 들어 부품 제작공정을 나타내면 그림 1과 같다.

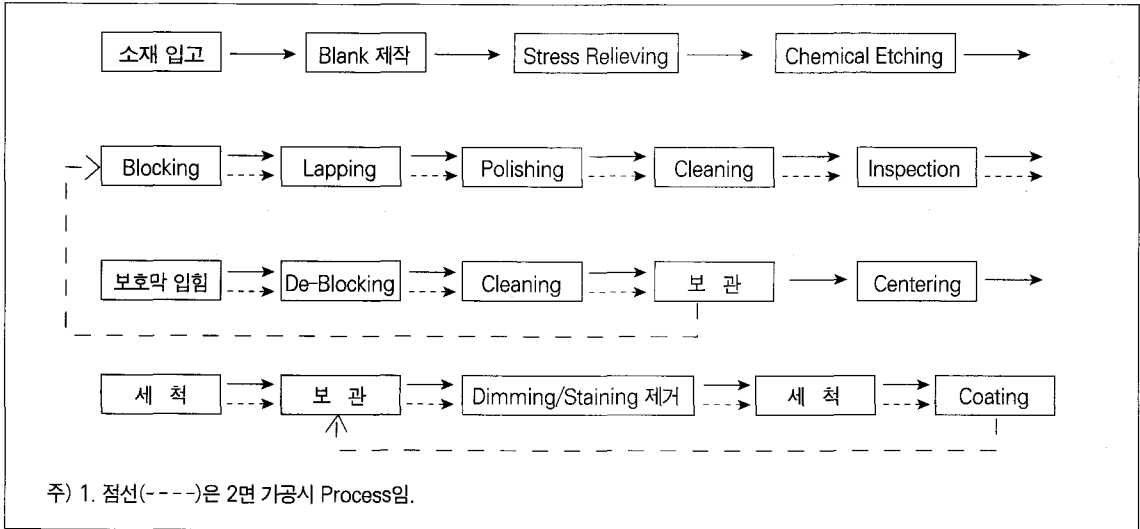


그림 1 Optical glass를 이용한 광학부품의 제조공정

위의 그림에서와 같이 광학부품의 제작은 일반적으로 소재 선정 및 입고, lapping 및 polishing, centering, 세척, coating 등의 공정으로 이루어진다. 위의 process에서 보면 특이한 점은 blank 제작 후 stress relieving과 chemical etching 공정 후 광학적인 가공 즉, lapping과 polishing을 수행한다는 것과, coating 전에 표면흠점(表面欠点)인 dimming과 staining을 제거하기 위한 특수한 세척을 한다는 것이다.

이하에서는 위의 공정 순으로 특징과 주의 사항에 대해서 논한다.

III. 제조 공정 및 특기 사항

1. 소재 선정

가. Optical glass의 제조공정

Optical glass의 고전적인 제조공정은 Mixing of raw material → Melting → Annealing → Ingot selection → Cutting → Weight adjustment → Softening by heating → Pressing → Annealing → Inspection 등이다.

Optical glass는 다른 일반 glass와는 달리 여러 가지 특성이 요구된다. 즉, 광학적 특성, 열적 특성, 화학적 특성, 기계적 특성뿐만 아니라 glass의 uniformity가 아주 중요하다. 이와 같은 특성을 만족시키기 위하여 optical glass의 제조자는 원재료의 선정 및 mixing, melting시 교반 작용, annealing과 cooling의 최적화 등을 위하여 많은 주의와 노력을 집중한다.

나. Optical glass의 특성

Optical glass란 용어는 프리즘이나 렌즈와 같은 광학 부품용으로 사용되는 조직이 균질한(Homogeneous) glass를 일컫는 것으로 일반 glass와 구별한다.

이와 같은 optical glass에 요구되는 특징은 다음과 같다.

(1) 조직이 균질하고 등방성일 것(Homogeneous, Isotropic).

Optical glass의 특징 중 가장 중요한 것으로 melting시 지속적인 교반(stirring)을 하는 것, clay pot대신 platinum pot에서 melting하는 것, 정밀한 annealing공정을 진행하는 것 등은

조직의 균질성과 등방성을 위한 것이다.

(2) 색깔이 균질하거나 투명할 것(Uniform color or transparency).

이것은 조직 성분과 관련되는 것으로 원재료 mixing시 소정의 첨가원소를 첨가하여 균일하게 혼합되도록 melting시 교반작용을 한다.

(3) 흠점이 없을 것(Bubble, Striate, Stain, birefringency).

Optical glass에서 발생하는 흠점은 주로 melting시 발생하는 것으로 이를 방지하기 위하여 platinum pot를 이용한 continuous melting 방법을 주로 이용한다.

(4) 규정된 Optical 상수(굴절률과 아베 계수 등)를 가질 것.

이는 광학적인 특성으로 광학용으로 사용할 때 중요한 optical parameter가 굴절률과 아베의 계수이다. 일반적으로 굴절률은 $\pm(50 \times 10^{-5})$, 아베의 계수는 $\pm 0.8\%$ 의 오차 범위 내에 들어야 한다.

(5) 열적으로 안정하고, 충분한 기계적 강도와 내 화학성을 가질 것.

이 조건들은 주로 광학부품의 가공에 영향을 미치는 주요인자이다. 이중 기계적인 강도는 재료의 마멸도에 많은 영향을 미치며, 내 화학성은 가공완료 후 부품의 표면 흠점(Dimming, Staining, Latent scratch) 발생과 관련이 있으므로 선정할 때 특히 유의해야 한다.

다. Optical glass 선정시 유의사항

일반적으로 재료를 구입할 때 위의 특징이나 제조업체를 비교하지 않게 된다. 그러나 제조업체의 know-how에 따라 재료의 품질과 조성이 다르기 때문에 될 수 있는 대로 유명업체의 재료를 사용해야 한다. 또한 유명업체의 재료일지라도 여러 가지 특성이 다르므로 설계자나 optical engineer들은 필요한 특성을 정확히 파악하여 여러 특성들을 비교하여 구입해야 한다.

특히 optical glass는 수분(H₂O)과 반응하여 표면흠점(dimming, staining)이 발생되기 때문에 정밀 광학부품에 사용되어지는 소재일수록 내 화학성이 우수해야 한다.

재료의 검사방법은 가공업체에서는 특별한 방법이 없으므로 될 수 있는 대로 유명업체 제품을 이용하고, 재료의 균질성과 흠점 등은 간단한 polarimeter(편광기)를 이용하여 검사하면 효과적이다.

2. 소재 절단 및 blank제작

소재가 입고되면 먼저 소재를 소정의 형태로 절단하고 blank형태로 제작한다. 이 공정은 주로 diamond wheel을 이용한 grinding방법으로 진행한다. 이 공정에서 주의 사항은 다음과 같다.

가. Blank제작시 wheel 입자의 크기를 단계별로 하여 crack층을 최대한으로 줄일 것.(Blank:유동입자에 의한 가공인 lapping이나 polishing을 위해 grinding방법으로 소정의 형상을 제작하는 것.)

그림 2에서 보는 바와 같이 optical glass는 경취 재료로 가공후 crack층이 발생한다. 이와 같은 crack층은 광학계의 성능을 저하시키는 요인이므로 diamond wheel의 입자의 크기를 단계

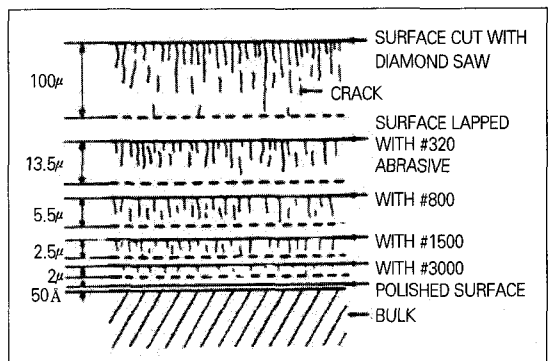


그림 2 Optical glass의 각종 가공시 발생한 crack층의 깊이

별로 하여 crack층의 깊이를 최대한 작게 해야 한다.

나. Blank chamfering부 가공시 특히 주의할 것.

Blank를 제작할 때 curve generator 등의 장비에서 diamond wheel을 이용하여 chamfering작업을 한다. 날카로운 모서리 부위를 diamond wheel로 chamfering시 crack이 많이 발생하고 제품에 chipping현상이 발생된다. 그러므로 정밀광학부품에서는 될 수 있는 대로 grinding방법으로 chamfering을 하지 말고, lapping과 polishing 방법으로 chamfering을 하고 될 수 있는 대로 chamfering부도 polishing해야 한다.(Chipping:특히 경취 재료에 많이 발생하는 현상으로 날카로운 모서리부가 미세하게 탈락되는 현상.)

Chamfering의 목적은 취급의 편이성 외에 효율적인 조립을 위하여, 제품의 손상방지를 위해, 다음 공정의 효율적인 수행과 정밀도 유지를 위한 것들이다.

3. 응력 제거(Stress Relieving)

Optical glass와 같은 경취 재료도 금속 재료와 마찬가지로 外力에 의한 응력(stress)을 받는다. 응력은 glass를 제조할 때 melting 후 cooling할 경우, 가공 공정시 외력에 의해 발생한다. 이와 같은 응력은 재료의 흠집이므로 광학계의 성능을 악화시키는 것은 주지의 사실이다.

특히 광학부품을 제작할 때 외력을 가장 많이 받는 blank 제작시 많은 응력이 발생한다. 그러므로 정밀 광학부품을 제작할 때에는 필히 blank 제작 후 stress relieving인 annealing작업을 해야 한다. 이와 같은 응력은 편광기를 통해 응력의 존재유무와 세기를 확인할 수가 있다.

Stress relieving조건은 재료에 따라 다르므로

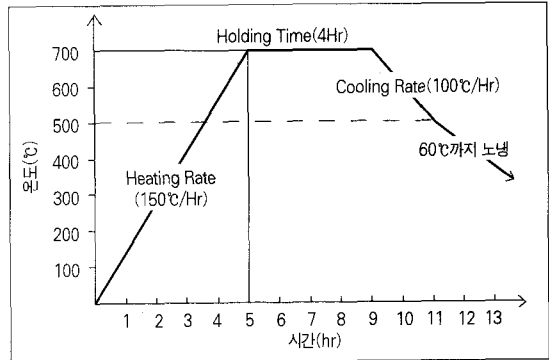


그림 3 Zerodur의 응력 제거 선도 (분위기 : 산소 분위기)

각종 재료에 맞는 stress relieving 조건 선정이 중요하다. Stress relieving시 주의해야 할 점은 첫째, 적정 heating 선도의 선정, 둘째, 노 분위기 선정, 셋째, heating rate와 cooling rate를 될 수 있는 대로 천천히 할 것 등이다.

그림 3은 대표적인 저팽창 재료인 Schott사의 Zerodur에 대한 응력제거 선도이다.

4. Chemical etching

위의 그림 2와 아래의 그림 4에서 보는 바와 같이 grinding이나 lapping 후에 glass층에 미세한 crack층이 발생한다. 이와 같은 crack층은 경취 재료의 특성상 계속 성장하여 광학계의 성능을 악화시킬 뿐만 아니라 glass의 강도를 취약하게 한다. 이와 같은 이유로 grinding이나 lapping시에 발생한 미세한 crack층을 제거하고, glass층의 구조 강화를 위하여 chemical etching을 실시한다.

가. Grinding이나 lapping 후의 glass 표면의 형태

그림 4에서 Subsurface damage 즉, crack층의 깊이(F)는 $F=kh$ 으로 나타낼 수가 있다. 여기서 k는 기준 설정에 관한 것으로 k=4인 경우는 cluster기준(집단적으로 crack이 많은 부)이

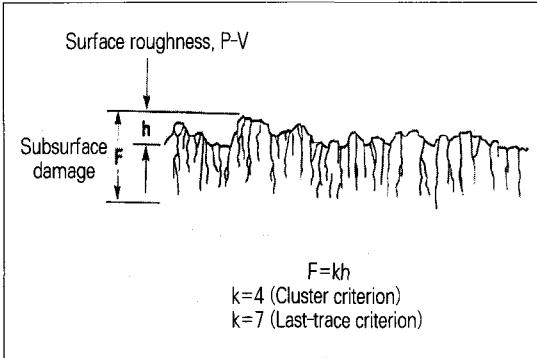


그림 4 Grinding 이나 lapping 후의 glass 표면의 형태

고, $k=7$ 인 경우는 last-trace 기준(마지막 crack 층까지)이다. 또 h 는 표면 거칠기의 P-V (Peak-to-Valley 또는 R_{max})이다. 만약 가공 후의 표면 거칠기가 $4.0\mu m$ P-V 이라면 마지막 crack 층까지의 깊이는 $F=kh=7 \times 4$ 에서 $28\mu m$ 이다. 그러므로 crack 층이 없는 glass 층을 위해서는 $28\mu m$ 이상을 etching 해야 되는 것이다.

나. Etching 량(식각량)의 결정방법

위 방법과 같이 표면 거칠기를 이용하여 crack 층의 깊이를 구할 수가 있는데 etching 량(식각량)의 결정방법에 대해서 구체적으로 알아 본다.

(1) 표면 거칠기를 측정하여 P-V 값을 확인한다.

(2) 식 $F = k h$ 에 의거 crack 층의 깊이를 확인한다.

(3) 시편을 제작하여 특정 용액의 조건과 etching time 하에서 테스트를 해 단위 식각량을 결정한다.

(4) 위의 (2)와 (3)항으로 요구 식각 시간을 산정하여 etching 을 실시한다.

다. Chemical etching 방법

Chemical etching 시 etchant 는 주로 불산 (HF) 을 사용하는데 적용량은 경우에 따라 다르다. 주로 HF(불산)과 H_2SO_4 (황산)을 50:50으

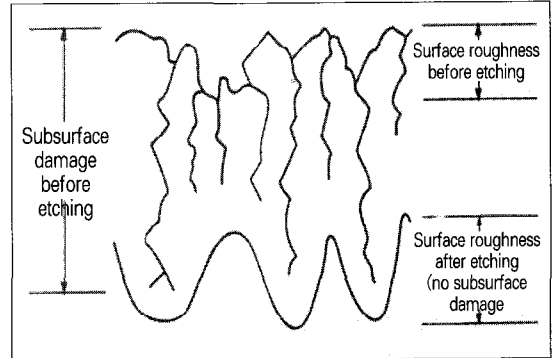


그림 5 Optical glass의 etching 전후의 표면구조

로 사용한다. 이중 optical glass를 실제적으로 식각하는 것은 HF 이고 H_2SO_4 은 HF를 활성화시켜 준다.

HF는 비중이 1.27로 물이나 알콜 등보다 무거우므로 이들 용액과 함께 사용할 때에는 침전이 일어나 원활한 etching이 수행되지 않으므로 stirring 작용이 필요하다. HF는 인체에 아주 유해하고 피부를 파고 들어가면서 부식시키므로 안전에 특히 유의해야 한다.

또한 HF 등으로 etching한 후 확실히 중화를 시키고 용액을 건조시켜야 한다.

라. Etching 전후의 optical glass의 표면 구조

Etching 완료 후의 상태는 육안으로 보면 윤(광택)이 난다. 이것은 crack 층이 없어져 빛의 산란이 많이 발생하지 않기 때문이다. 그리고 표면 거칠기를 측정하면 그림 5와 같이 etching 후의 표면 거칠기가 전보다 더 악화된다. 그리고 강도 테스트를 해보면 etching 전보다 기계적인 강도가 아주 증가하는 것을 알 수 있다.

5. Blocking

Blocking이란 blank 상태로 제작 완료한 재료를 lapping과 polishing을 위하여 face plate 등의 치구에 부착시키는 것을 말한다. Blocking을

하는 방법은 부품의 정밀도나 형태에 따라 여러 가지로 나눌 수가 있는데 크게 분류하면 열간 blocking과 냉간 blocking으로 구분되는데 그 종류와 특징은 다음과 같다.

가. 각종 blocking방법과 특징

(1) 열간(hot) blocking

(가) 점탄성(Visco-elastic)물질을 이용하는 방법

Wax, pitch, synthetic resin, adhesive 등의 점탄성 물질에 열을 가하여 blank를 face plate 등의 치구에 부착시키는 방법으로 가장 일반적으로 사용되는 방법이다. 점탄성 물질에 따라 가열 온도, 점성도, 접착강도 등에 많은 차이가 있으므로 실제 사용할 때는 여러 가지 실험을 통해 최적의 점탄성 물질을 선정해야 한다.

(나) 석고를 이용하는 방법

이는 prism 등과 각형(角形)의 저(低) 정밀도 부품을 제작할 때 주로 사용하는 방법으로 blocking하는 메카니즘은 아래 그림 6과 같다.

①face plate, ②석고, ③제품, ④이형재(離型材), ⑤보조 plate

(2)냉간(cold) blocking

(가) 기계적인 방법을 이용하는 방법

내구성이 요구되는 경우나 가공 힘이 많이 적

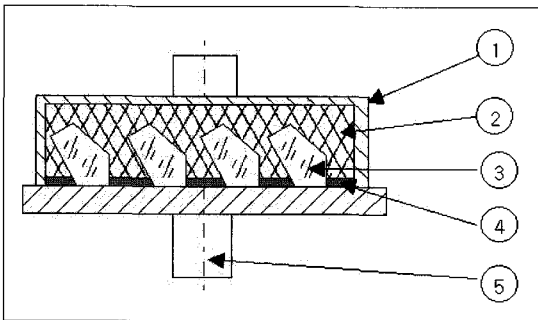


그림 6 석고를 이용하여 blocking하는 경우

용되는 경우에 주로 사용하는 방법으로 광학 부품의 blank 등을 제작할 때 적용되는데 제품에 clamp 등의 도구를 이용하여 직접 누르는 방법이다. 이 경우 너무 많은 힘을 가하면서 제품의 crack이나 변형이 발생할 우려가 있으므로 주의해야 한다.

(나) Optical contact으로 blocking하는 방법

이는 분자간의 결합인 Van der Waals' force에 의한 접합방법으로 정밀 광학부품(평면형)의 제작시 사용하는 방법으로 접합하려는 두 제품의 평면도(flatness)가 $\lambda/4$ 이하, 그리고 표면 거칠기(surface roughness)가 500\AA P-V, 10\AA rms이하이면 접합이 가능하다.

Optical contact력의 세기는 두 부품간의 간격(Separation)이 100\AA 인 경우 약 14 Kg/cm^2 이고, 두 부품간의 간격(Separation)(S)과 Optical contact force(F)와의 관계는 $F \propto (1/S^4)$ 이다.

나. Blocking시 주의사항

Blocking은 광학부품의 제작시 필수적인 공정으로 생각하는 경우가 많다. 그러나 정밀 광학부품을 제작할 때는 blocking공정이 정밀도를 좌우하는 경우가 많다.

Blocking시 가장 주의해야 될 사항은 가공과 de-blocking 후 변형이 적어야 한다. 아무리 가공을 잘 했더라도 de-blocking 후 변형이 발생하면 무용지물이다.

그 다음은 blocking 및 de-blocking이 용이해야 하고 이에 사용하는 수단이 환경조건을 만족해야 한다.

다음 호에서 lapping, polishing, 세척공정 등에 관해 계속 기재한다.