

플라스틱 광학, 유리광학에 도전

유리광학이 지배해 왔던 분야에 플라스틱 광학이 도전하고 있다.
 유리에 비해 가격 면에서 유리한 대체품이 될 수 있으며
 설계상 융통성이 많아 유리광학 설계에서 수반되는 제약을 상당 부분 해소한다.
 응용 분야는 텔레커뮤니케이션, 고해상도 마이크로디스플레이 등으로 넓어질 것이다.

자료 : PHOTONICS SPECTRA. 2000. 5.

1960년에 세계 최초로 이스트만 코닥사 (Eastman Kodak Co.)가 당시 기준으로는 정밀한 품질의 사출성형광학 제품을 생산했다. 최근 기준으로 볼 때는 조잡한 품질이었으며 주로 구면(Spherical) 렌즈에 한정되었다.

이후 플라로이드사(Polaroid Corp.) 및 몇몇 회사가 정밀 선반이나 측정기술을 개발했으며 이에 힘입어 생산기법이 팔목하리 만치 향상되었다.

또 많은 회사들이 몇몇 분야에서 미세 회절 한계공차(Subdiffraction-Limited Tolerances)로 고품질의 제품을 생산하고 있다. 예를 들면 콤팩트 디스크용 광학부품이 그러하다. 이것은 유리 광학이 지배해 왔던 분야에 플라스틱 광학이 도전하고 있음을 의미한다.

앞으로 응용 분야는 텔레커뮤니케이션 (Telecommunication), 고해상도 마이크로디스플레이 (Microdisplay) 및 Longer Tern High Speed Computer가 될 것이다. 현재의 기술 수준으로만도 유리광학에 저렴한 대체품이 될 수 있으며 제품이나 부품의 설계상 보다 많은 융통성을 가지고 있다.(유리광학 설계에 수반되는 제약성을 플라스틱 광학에서는 상당히 해소할 수

있다는 장점이 있다.)

생산비용상 고려할 점

극동지방의 저렴한 인건비에도 불구하고 대량 생산을 할 때는 유리광학에 비하여 가격 경쟁력 상 우위를 누릴 수 있다. 그러나 플라스틱의 경우 맞춤형 치구비용(Tooling Expense)을 염두에 두어야 하며 소량 생산일 때는 이러한 전용 맞춤형 치구 비용 때문에 유리에 비하여 가격 경쟁력 면에 불리할 때가 있다. 왜냐하면 유리일 경우 이러한 치구에 드는 별도 비용이 없거나 있어도 최소일 수 있기 때문이다.

최근 이 플라스틱 광학 기술수준 향상으로 과거보다 많은 원료(소재)를 활용할 수 있게 되었으며 비구면 및 회절표면(Diffractive Surface) 광학품을 플라스틱류로 할 경우 아주 저렴한 생산 비용으로도 가능하며, 특히 여러 가지 모양을 하나로 통합할 수 있기 때문에 조립비 절감을 기할 수 있다. 때문에 주로 플라스틱을 기본으로 하는 주요한 이유가 될 것이다.

위에 언급한 융통성의 증가로, 광학설계자는

설계상 부품 수를 줄일 수 있으며 따라서 생산비 절감 효과와 제품의 소형, 경량화를 가할 수 있게 되었다.

플라스틱 광학 부품의 생산방법은 대체적으로 사출성형, 사출/압축 성형, 압축성형 주조 및 Diamond-Point 가공 등이다.

성형 플라스틱 부품은 사용상 몇 가지 제약이 따른다, 즉 낮은 유리 전이온도(Glass Transit Temperature)와 높은 열팽창 계수 때문에 100℃ 이상에서는 사용이 제한된다는 것이다. 열팽창도 및 열에 의한 변화도(dn/dt)은 유리에 비하여 플라스틱이 높으며 이러한 것은 어떠한 응용 분야에는 바람직하지 않을 결과, 즉 초점거리 변화 및 수차(aberration)를 일으킬 수 있기 때문이다.

또 대부분의 플라스틱 소재는 수분 함유가 광학성을 저하시키지만 신소재 개발로 이러한 결함은 많이 줄게 되었다. 그러나 신소재 개발에도 불구하고 아직 유리소재에 비하여 굴절률이 떨어지며 1.492에서 1.590에 머무르고 있다.

사출성형품은 이중굴절(birefringence)을 일으키는 수가 있으며 이는 편광효과에 민감한 광학 구조물(optical system)에는 치명적인 영향을 미친다. 이러한 굴절률 변화는 사출 성형품의 결함이다. 이러한 점에도 불구하고 색수차 수정, 고급 설계가 Polycarbonate나 Acrylic 분야에 이루어지고 있다.

광학설계시 고려할 점

플라스틱 소재 사용시, 광학설계자는 고객과 제조업자와 긴밀히 협조해야 한다.

지도적 위치에 있는 설계회사에 의하여 만들어진 많은 설계 중 제조업자의 참여 없이 돼 실제 생산단계에서 무용지물이 된 경우를 볼 수 있었다. 또 고품질 유리광학(glass optics)을 모방하여 설계를 하는데, 이렇게 하면 금형 제작자는 설계자와 고객에게 무엇이 가능하고 무엇이 가능하지 않은지를 가르쳐야 하므로 개발주기를 길게 할 뿐이다.

〈표 1〉 플라스틱 광학제품의 허용공차

Property	Relaxed Tolerance	Industry Standard	Precision Standard
Focal Length(초점거리)	3 percent	1 percent	0.50 percent
Radius of Curvature(곡률)	3 percent	1 percent	0.50 percent
Thickness(두께)	±0.15mm	±0.05mm	±0.05mm
Diameter(구경)	±0.15mm	±0.05mm	±0.025mm
Power(배율)	5 waves	2.5 waves	0.5 waves
Irregularity(표면 요철)	2.5 waves	0.75 waves	0.5 waves
Scratch/Dig	80/50	60/40	40/20
Centration(동심도)	±3min	±2min	±1min
Cycle Time ¹ (성형시간)	45 s	60 s	75 s
Machine Yield ² (가공 주기)	95 percent	90 percent	80 percent
Parts/Hour/Cavity(시간당 Cavity의 사출량)	76	54	38

1. 19-mm 구경, 중심두께 2mm와 명시된 공차를 가진 초승달형(meniscus) 오목 렌즈의 경우를 가정함.
2. Machine Yield(기계생산률)의 손실률(loss)은 기능상(Function)의 불량과 미관상(Aesthetic)의 불량을 기준으로 산출하였음.

최선의 방법은 유리광학설계를 변경하려고 하기보다는 바로 플라스틱 분야를 설계하는 생각으로 진행하는 것이다. 금형 제작자는 검증된 기술과 각각의 광학부품과 광학 조립품의 기능상으로 요구된 것을 가능하기 위한 검증된 장비를 사용해야 한다.(표 1 참고)

엄격한 허용공차를 가진 설계는 보다 긴 가공시간과 보다 많은 Scrap이 나오게 되어 있으므로 광학 부품이든 조립품이든 비용증가가 당연히 수반될 것이다.

고품질 플라스틱 광학부품을 생산하는 열쇠는 '표면 수축을 어떻게 제어하느냐'이다. 고품질 광학부품을 생산하기 위해 표면 정확도(Surface Accuracy)를 1000분의 1mm 이하의 최고점 최저점(Peak To Valley) 편차를 유지해야 한다. 균일한 단면을 갖게 설계된 광학부품을 대부분 생산이 용이하다. 네가티브(Negative(minus)) 렌즈와 포지티브(Positive(plus)) 렌즈의 경우 렌즈의 중심에서 가장자리에 이르기까지 어떻게 수축을 제어하느냐는 문제가 항상 수반된다. 프리즘의 경우 각각의 면에(facet) 걸쳐 원형에 어떻게 충실할 수 있느냐 하는 대단히 어려운 문제가 수반된다.

플라스틱 광학설계상의 대략적인 원칙은 다음과 같다

- 길고 얇은 플라스틱 광학 부품의 경우 제품의 종횡비(Aspect Ratio)와 인력(gravity)가 줄 수 있는 영향력을 고려해야 한다.

- 각기 다른 영향력을 가진 부품을 조립할 때 각 결합부위(Edge Of Optical Insert)의 가장자리에 일어나는 각기 다른 열특성(열팽창계수)를 수용하기 위하여 광학표면(사출된 부품의 크기)이 가용공간(Usable Clear Aperture)보다 크게 해야 한다.

- 사출 광학부품의 장착부위는 표면의 주변에 따라 일정해야 한다. 이는 불규칙한 수축을 예방

하기 위한 것이다.

- 크고 두꺼운 광학부품은 사출 업자에게는 항상 골칫거리다. 12mm 이상의 두께를 가진 플라스틱 광학부품은 결(Flow Line)과 침하(Sink) 같은 표면에 나타나는 결함이 항상 수반된다. 그리고 필요한 긴 성형시간에서 올 수 있는 재료의 퇴화로 인한 표면의 흑백점이나 뿌연 안개가 낀 것 같은 결함이(육안으로 볼 수 있는) 생긴다. 그러나 주조(Coining)방식이나 사출 압축/방식을 채택함으로써 이러한 문제점을 해소할 수 있게 되었다.

재료와 성형

플라스틱 광학품에 사용되는 재료는 일반적으로 두 개의 특성을 가지고 있다(표 2 참조). 투명하며 비결정체이다.

비결정체 플라스틱은 종(Flow) 횡(Transverse) 방향에서 일정한 수축률을 가지고 있다. 이러한 특성은 정밀 굴절 및 반사 광학부품에 요구된 공차를 유지를 위해서는 미묘한 것이다. 이러한 특성을 요구하기 때문에 어떤 Polymers 재료는 정밀 광학 부품생산에 적합치 않다.

특히, 화학 제품의 유기 solvent 같은 데에 노출될 가능성 높은 광학부품 생산시 플라스틱 재료선택에 신중을 기해야 한다.

성형기술이 어떠한 광학부품은 전형적으로 일반 성형업자가 생산하는 일반부품의 생산비용에 비해 높다.

- 간접비(Overhead Expense) 또한 높다. 왜냐하면 측정기기의 비용 및 숙련된 기술요원이 필요하기 때문이다.

- 광학품은 성형과정에서 조심스럽게 다루어져야 하며 그렇지 않으면 표면에 손상을 가져올 수 있다.

- 사출방법으로 정밀광학품을 생산할 때에는

〈표 2〉 플라스틱 소재의 광학특성

	Units	Acrylic	Styrene	NAS ¹	SAN ²	Polycarbonate	Zeonex
Optical Properties(광학 특성)							
Refractive Index(N _d)(굴절률)		1.491	1.59	1.56	1.57	1.584	1.525
Abbe Vaue(V _d)(아베치)		61.4	31.1	35	37.8	34.5	56
dn/dt	×10 ⁻⁵ /°C	-12.5	-12	-14	-14	-14.3	-10
Luminous Transmittance(빛투과율)	%T@3mm	92	88	90	88	90	92
Birefringence Potential(복굴절)	Qualitative	Low	High	High	High	High	Low
Relative Haze(탁도)	%	2	3	3	3	3	2
Mechanical/Thermal Properties (기계/온도 특성)							
Coefficient of Linear Expansion (열 팽창계수)	cm/cm×10 ⁻⁵ /°C	6	6	6.8	6.8	6.9	6
Deflection Temperature (굴절 변화 온도) 3.6°F/min@66 psi	°C	101	110	100	100	146	147
Water Absorption(수분 함유율) (Immersed24h@23°C)	%	0.3	0.2	0.15	0.3	0.15	0.01
Hardness(Scratch Resistance)(경도)	Rockwell M	90	90	80	75	50	75
Izod Impact Resistance (Izod 충격 시험)	ASTM D256	0.35	0.35	0.5	0.45	2	0.32

위에 표시된 성분 값은 대표적인 것임. 특별한 소재의 실제 성분값을 알고자 할 때에는 제조원에 문의할 것

높은 용해도와 성형온도가 필요하다. 따라서 보다 긴 가공주기(Machine Cycle)가 요구된다. 사출성형의 경우 냉각과정보다 열처리(Annealing) 과정에 더 염두를 두어야 한다. 전문 광학성형업자가 아닌 일반 성형업체에서 정밀 플라스틱을 구매하고자 하는 우를 범한 수많은 회사를 보았으나 그들의 결과는 대부분 실패작이었다. 성공적인 사출업자는 광학수준에 맞는 치구를 만드는 데에 경험이 있어야 한다.

냉각로(Cool Channel)의 설계는 금형의 표면의 온도를 일정하게 유지하도록 설계되어야 한다.(오차는 ±1°F이어야 함) Mold Base와 캐비티(Cavity Set)는 성형면(Mold Face)의 녹을 방지하기 위하여 스테인레스 스틸로 만들어야 한다.

최근에는 다이아몬드 회전기계(Diamond

Turner Machine)가 많이 나오고 있으며, 이러한 기계는 광학용 금형에 여러 가지 비철재료의 표면정밀가공을 가능케 하고 있다.

그러나 이러한 비철재료는 스테인레스 재료보다 내구성이 떨어지는 단점이 있다. 또한 이렇게 생산된 광학삽입물(Optical Insert)은 후가공 처리(가공된 표면의 연마처리) 등을 하지 않으면 금형 다이아몬드 가공흔적이 남을 수 있다.

박막과 코팅

유리와 마찬가지로 플라스틱 광학부품도 진공 증착에 의한 박막처리를 할 수 있다. 플라스틱은 열한계(Temperature Limit) 때문에 피막처리는 35°C에서 45°C범위 내에서 하고 있다. 따라

서 유리피막처리보다는 내구성이 떨어지지만 MIL-C-48497에 요구된 경도와 항습도 검사규격에 들어갈 수 있는 정도의 수준을 유지하고 있다.

대부분의 코팅에 사용되는 무기물 재료에 대하여 대부분의 플라스틱소재는 그 열팽창계수가 높으므로 피막처리를 할 때는 유리의 경우 보다 어려움이 동반된다. 코팅재료를 여러 가지 첨가할 때 특히 다층막 처리 때 피막균열(Crazing)이라는 어려운 문제가 항상 따라 다닌다.

Hard Coating의 경우에 과거 10년 동안 거듭된 많은 기술상의 진보는 유리에 비교될 만큼 플라스틱 제품에 긁힘 방지력 (Scratch Resistance)을 향상시켰다. 이러한 코팅은 다층막 코팅시 중간막에 이용되며 이렇게 함으로써 균열의 발생을 줄여 줄 수 있다.

대부분의 반사방지 코팅은 불화마네시움 (Magnesium Fluoride) 1/4단층막으로 플라스틱 소재에 따라 대체적으로 반사율은 2% 내지 3% 정도 줄일 수 있다. 그러나 이러한 처리방식은 극히 민감한 문제이며 특히 외계에 사용(노출)되는 광학품에 고려되어서는 안된다.

Polyorganosiloxane을 사용한 경화 코팅 (Hard Coating)을 하면 긁힘에 강할 뿐만 아니라 표면반사율은 면당 1% 미만인 렌즈를 만들 수 있다.

제 1면, 제 2면 반사경은 플라스틱 소재를 이용해서 만들 수 있다. 보통 사용하는 피막소재는 금, 은, 알루미늄, 크롬 같은 것을 사용한다. 95% 이상 반사율은 서로 다른 굴절율을 가진 (Refractive Indices) 피막재를 다층적으로 증착시켜 원하는 제품을 얻을 수 있다. 전자빔 분산 (Beamsplitter)식 코팅은 다양한 투과율과 반사율을 가진 절연체 소재를 사용해 가능하다. 이러

한 피막형성 방식은 서로 다른 빛의 입사각 (Incidence)과 파장(Wavelengths)을 위하여(사용 목적에 따라) 의도적으로 될 수 있다.

뒤틀림(Distortion) 방지

사출성형과정과 박막코팅은 서로 상호 영향을 미친다.

성형과정에서는 표면공차에 합치하는 부품이 피막처리 후에는 표면이 뒤틀리는 경우를 볼 수 있는데, 성형과정을 피막처리과정을 최적화하여 이러한 뒤틀림 현상을 줄일 수 있다.

예를 들면 80×40×2.5mm 반사경을 성형할 때 주로 이러한 현상이 있으며, 성형에서는 후 평면정도(Surface Accuracy) 규격에 맞게 되었으나, 피막처리 후 면의 뒤틀림 현상을 볼 수 있다.

이러한 것은 성형된 면에 발생한 성형시 과도한 열변화가 성형품에 스트레스(Stress)를 주었기 때문이라고 생각되었으며, 이후 코팅과정에서 이 스트레스가 경감하게 되며, 이것이 뒤틀림을 야기한다고만 생각되었다. 따라서 이러한 열변화에 대처하기 위하여 금형을 수정함으로써 위의 문제를 해결(The Surface-Flatness Requirement) 하기도 하였다.

그러나 선정된 광학 박막재료의 종류와 적용된 피막층수의 여하가 또한 뒤틀림의 주요 원인의 하나가 될 수도 있다.

플라스틱 광학 설계를 고려 할 때는 이 분야에 경험이 많은 설계자가 일을 하는 것이 매우 중요하며 특히 설계초기 단계에는 이 분야에 자격을 갖춘 금형 제작자와 협력하는 것이 중요하다. 많은 현장 경험을 토대로 한 현장기술자료를 참조하지 않으면 실제 제품의 양산 단계에서 실패하는 경우가 많다.