

플라스틱 광부품의 성형기술

이 글에서는 플라스틱 광학제품의 다양성·유용성·성형법과 광학용 플라스틱의 종류에 대해 간략히 소개하고 광제품 사출성형 설계의 중요성, 정밀 사출성형의 수치해석 등에 대해 설명한다. 권태현, 윤경환

플라스틱 광학제품의 다양성

최근 들어 광학의 응용분야는 새로운 광학기기들의 개발과 함께 지속적인 성장을 하고 있다. 이러한 광학기기들의 재료로는 유리가 주종을 이루고 있었으나, 대량 생산이 가능하고 값이 싸며 가벼운 물질인 플라스틱이 대체 물질로 각광을 받고 있다. 광응용 제품에 대한 플라스틱의 이용은 새로운 것은 아니며, 1950년대에 이미 단순한 콘덴서 렌즈, 장난감용 대물렌즈나 선글라스 등의 저급 제품의 유리제품을 대체하다가 1960년대와 1970년대에는 사진기의 뷰파인더, 돋보기, 고급의 콘덴서 렌즈, LED 디스플레이 어레이, 포토 셀의 렌즈 등의 좀더 고급 제품에 응용되기 시작되었다. 1980년대 이후부터는 금형 기술의 개발과 더불어 최고급 광 제품에서의 적용이 점차 늘어나고 있다. 최근에는 초정밀 사출성형 기술을 이용하여 대량

생산의 적용이 성공한 각종의 광디스크, 프로젝션 텔레비전의 렌즈, 각종 프리즘, 비구면 대물렌즈 등의 제품이 대표적인 예이다. 특히 IT 산업과 MEMS 기술의 발전과 함께 각종의 새로운 플라스틱 광학부품들의 개발 필요성이 대두되고 있다. 표 1에는 각종 플라스틱 렌즈들을 요구되는 면 정밀도에 따라 분류하였으며, 어느 정도 수준의 정밀도가 각종의 광학 제품에서 요구되는가의 판단 기준이 될 수 있을 것이다.

광학용 플라스틱의 종류

투명 플라스틱 재료는 광디스크, 광파이버, 비구면 렌즈, 투명

필름이나 시트 등의 제조공정에 적용되면서 그 사용 범위 및 빈도가 점차 증가하고 있다. 이러한 광학 제품들은 형상정밀도가 허용치 내에 있어야 하며, 사용 환경 하에서 장시간 동안 충분히 기능을 발휘하여야 하므로 재질의 선택 또한 중요하다. 투명 플라스틱 재료 중 광학용품에 가장 대표적인 수지로는 PMMA와 PC를 들 수 있다. PMMA는 아크릴 계통의 수지로 투명도가 유리보다도 좋고 뛰어난 외관을 가지고 있어 가장 많이 사용되고 있으나, 내열성과 흡수성 또는 흡습성에 문제가 있다. PC는 현재 광디스크의 주재료로 쓰이고 있으며, 내열성과 흡수성은 좋은 편이나 광학 특성, 특

표 1 각종 플라스틱 렌즈의 정밀도

레벨	렌즈의 종류	요구 면 정밀도	뉴턴링의 갯수
I	픽업 렌즈	<0.06 μ m	<0.2
II	카메라 촬상계 렌즈	0.3~0.6 μ m	1~2
III	finder lens, AF lens	1.5~3.0 μ m	5~10
IV	안경, 선글라스 등 일반 렌즈	3~10 μ m	>10

권태현/ 포항공과대학교 기계공학과, 교수/ e-mail : thkwon@postech.ac.kr

윤경환/ 단국대학교 기계공학과, 교수/ e-mail : khyoon@dankook.ac.kr

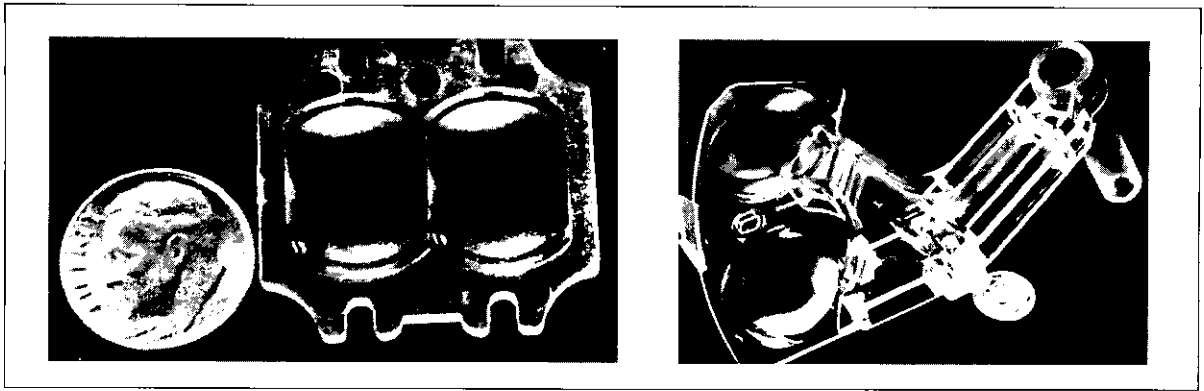


그림 1 마운팅 플랜지와 포스트와 함께 성형된 렌즈 예

히, 잔류 복굴절의 양이 크다는 약점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해서 최근에 흡습성을 줄이거나 복굴절의 양을 줄여 개발되어 사용되는 수지로는 ARTON과 OPTOREZ, ZEONEX 등이 있으며, 재료 자체가 상당히 고가라는 단점이 남아 있다. 이러한 경향은 새로운 고분자 재료의 개발을 요구하고 있으며, 신소재로서의 플라스틱 재료의 개발과 더불어 더욱 심화되고 있다.

플라스틱 광학부품의 유용성

광학용 제품에 유리 대신 플라스틱을 사용하기로 결정하는 가장 중요한 이유는 생산성 향상으로 인한 생산비용의 절감이다. 비용절감을 이룩할 수 있었던 가장 핵심적인 요소는 일단 금형을 제작하면 플라스틱 재료를 금형 공간에 주입하여 똑같은 형상의 제품을 대량으로 복제하여, 즉 성형하여 제작할 수 있기 때문이다. 예를 들면, 유리로 렌즈를 만들 때 연마에 필

요한 시간이 매 제품마다 소요되기 때문에 정밀한 유리 렌즈는 고가가 될 수밖에 없다. 이에 비하여 금형 가공에 드는 비용이 고가이더라도 한 세트만 만들면 다량의 렌즈를 빠른 시간 안에 제조하여 생산성이 증가하기 때문이다.

광학용 제품에 유리대신 플라스틱을 사용하면 좋은 또 다른 중요한 이유는 새로운 특별한 모양의 제품에 적용할 수 있는 기회가 있다는 것이다. 사출성형 공정은 렌즈를 지지해 주는 브래킷이나 주변 기구들과 함께 성형을 할 수 있는 방법을 제공해주어 추후 조립 시 발생하는 오차를 줄이고 그에 드는 경비를 절감할 수 있는 길을 열어주었다. 그림 1에 두 가

지 예를 들었으며, 이는 설계자들에게 기구들의 조합 시 전체 시스템의 단순화 등의 창조적인 설계 가능성을 부여할 수도 있다.

위에서는 장점들만을 나열하였지만 단점도 있다. 정밀하게 연삭된 유리제품에 비해 사출성형된 플라스틱 제품은 복굴절현상으로 인해 광학적 성질이 상대적으로 저급한 단점이 있다. 따라서 사출성형을 이용하여 고품질의 정밀 광학제품을 제조하기 위해서는 복굴절현상을 예측하고 제어할 수 있는 기술을 확보할 필요가 있다. 한편, 유리 대신 플라스틱을 사용하는 경우에는 온도에 민감하여 70~80°C 이상에서는 거의 사용이 불가능하며 표면이 스크래치에 약하다는 단점도 있다. 하지만 이러한 단점들도 각종 제품의 적용 조건만 맞으면 위에서 열거한 여러가지 장점들이 더 크게 부각될 수 있는 것이다.

플라스틱 광학제품의 성형법

플라스틱 광학제품을 성형하는 방법은 다

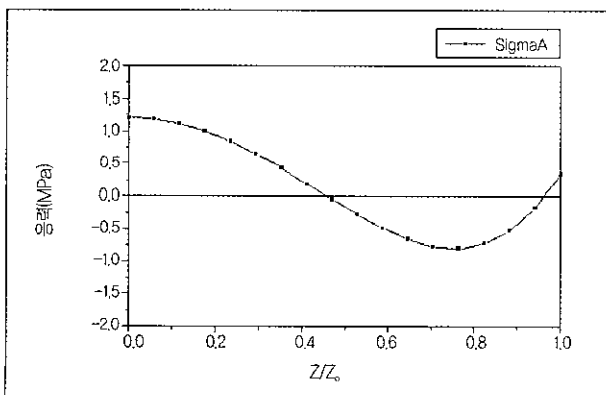


그림 2 평판 내 잔류응력의 두께 방향 분포

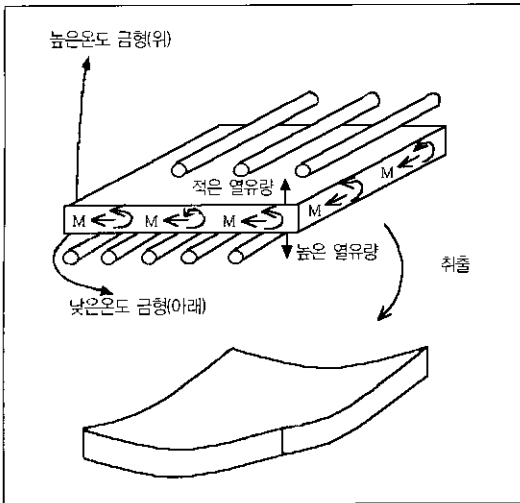


그림 3 불균형 냉각에 의한 평판의 전형적인 형

음과 같이 크게 나뉠 수 있다.

① 압축성형법 : 플라스틱을 유리전이온도 이상으로 올린 후 프레스를 사용하여 재료를 압축하면서 금형 공간을 채운 후에 금형면의 형상이 제품에 남게 된 상태에서 냉각을 시키는 방법이다. 주로 대형 제품에 적용되었으나, 최근 MEMS의 발전과 더불어 hot embossing 등의 적용으로 소형 정밀 광제품에도 응용되기 시작했다.

② 사출성형법 : 용융된 플라스틱 수지를 차가운 금형 캐비티에 충전시킨 후 수축을 보충할 수 있도록 계속적으로 보압을 건 후, 플라스틱을 충분히 냉각시킨 후에 금형을 열고 제품을 취출함으로써 공정의 한 사이클이 완료되는 성형법이다. 금형 기술과 사출기의 발달과 함께 초정밀을 요하는 광학제품들의 제조에 아주 널리 쓰이고 있다.

③ 사출/압축성형법 : 최근에는 사출성형기에 사출 이외에 압축 기능을 첨가하여 복굴절 및 잔류응력을 감소시킬 수 있도록 고안된 성형법이다. 금형 내에

사출 후 성형면 전면적에 고른 압력을 걸 수 있어 사출물의 평면상의 잔류응력 분포를 고르게 할 수 있어 DVD의 기관이나 MOD의 기관 등 정밀도를 요하는 광디스크의 기관들과 일부 고급 렌즈들에 점차 적용되고 있다.

광제품 사출성형 설계의 중요성

이러한 플라스틱 광학제품을 사출성형 혹은 사출·압축성형 공정을 통해 제조할 때 다음과 같은 사항들에 주의를 기울여야 한다.

- 형상의 정밀도를 위한 금형의 정밀 가공
- 잔류응력 및 열변형에 의한 최종제품의 형상 정밀도
- 최종제품에 존재하는 복굴절

이 중에서 첫 번째 사항은 금형의 정밀가공이라는 생산기술 분야로 그 중요성이 널리 알려져 있고 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이 글에서는 필자들이 초정밀 사출성형공정 기술의 확립과 과학적 금형설계, 그리고 체계적인 공정조건 결정법을 구축하기 위한 연구를 수행함에 있어서 특히 관심을 집중하고 있는 잔류응력 및 복굴절에 대해 좀더 자세히 기술하고자 한다.

잔류응력과 제품의 변형

플라스틱을 이용한 사출성형 공정 중 성형조건 변화는 최종 제품에 다른 열적, 기계적 이력을 가지게 하며, 각 제품에 고분자 물질 특유의 배향성과 잔류 응력을 남겨 최종 성형품의 광학적, 기계적 성질들과 형상정밀도까지도 결정짓는 요인이 되는 것이다.

사출성형 공정의 충전 중에 약간의 고분자 재료의 배향이 발생하고 이때는 잔류응력이 매우 작은 상태이다. 그러나 보압과정과 그 이후인 냉각과정에서 재료는 두께에 따라서 다른 열적 이력을 갖게 되고, 점탄성재료의 특성에 의해 제품 내부에 두께방향으로 잔류응력의 분포가 최종제품에

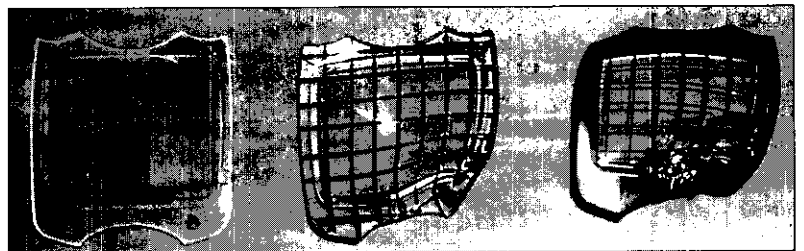


그림 4 휴대전화기 청부분 부품의 애널링 예

남게 된다. 사출성형된 평판 내의 잔류응력의 두께 방향 분포가 전형적으로 그림 2와 같이 발생하게 된다. 이 예는 사출성형된 Compact Disc를 잘라내어 층 제거법을 사용하여 측정한 실험 예로서 두께 방향으로 중심부 위에서 인장응력이 보이고 점점 줄어 압축응력 구간이 마지막으로 표면 근처에서 인장응력이 나타나는 대표적인 잔류응력의 분포를 잘 보이고 있다.

한편 그림 3에 보이는 바와 같이 금형의 냉각이 불균형을 이루는 경우 취출 후 변형을 일으키는 주요인이 되고 있다. 이러한 휨(warpage)은 금형 설계 시 냉각수로의 설계와 밀접한 관계를 가지며 광학 제품에서는 특히 유의해야 할 사항이다.

사출품 내의 고분자 물질의 배향 정도나 잔류 응력의 분포를 측정하는 것은 쉽지 않지만 사출품을 annealing하여 비교적 쉽게 확인할 수 있는 방법이 있으며, 이를 heat shrinkage method라

부른다. 그림 4에 한 가지 예를 보인다. 휴대 전화기의 창부분 부품으로 게이트 부분의 변형이 심한 것을 볼 수 있다. 이러한 제품들은 평소 사용하는 환경보다 열악한 조건 하에서, 즉, 휴대전화기를 뜨거운 자동차 속에 놓고 내리던지할 때 어떻게 변할 수 있을지를 보여주는 예라 하겠다. 중동 지역이나 아프리카에 수출할 때 이러한 잔류 배향 정도를 줄이는 연구가 미리 되어야 함은 필수적이다.

사출 성형품의 복굴절 분포

광은 횡파인데 이방성인 물질을 통과할 때는 진동 방향에 따라 빛의 속도가 달라진다. 이러한 이방성 물질에 있어서 방향에 따라 굴절률이 다르게 되는 현상을 복굴절(birefringence)이라고 한다. 플라스틱 광학 제품에는 사출성형의 충전 과정에서 유동에 의해 고분자 체인들이 특성의 배향을 갖게 되고 이에 따라 이방성이 발생하게 되어 복굴절이 분포하게 된

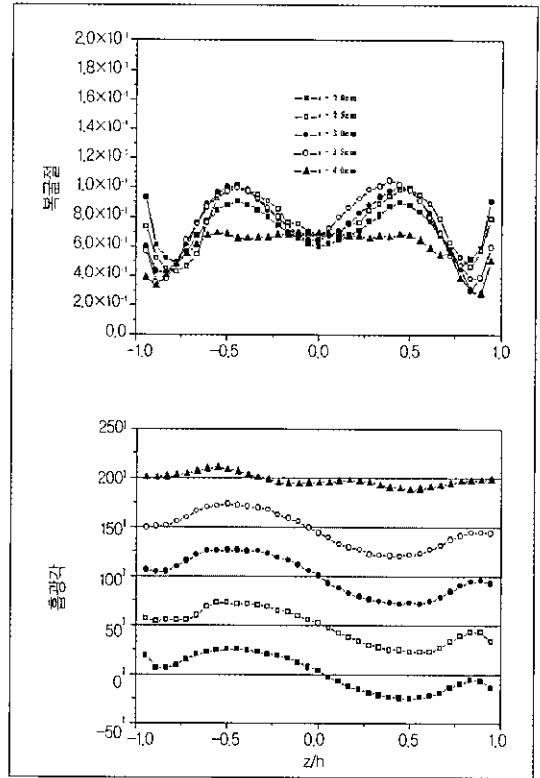


그림 6 사출성형된 MOD 기판의 복굴절 분포

다. 광학 사출품 내에 남아있는 복굴절의 양은 렌즈의 경우 수차를 발생시키고 디스크 기판의 경우에는 SNR비를 감소시키는 등 광학제품으로서의 품질을 떨어뜨리는 중요한 요인이 된다. 따라서 고급의 광학제품의 제조에 있어서 복굴절을 줄이기 위한 노력을 기울여야 한다.

그림 5는 특히 복굴절에 민감해서 기관 내 복굴절을 줄이는 연구가 가장 활발한 magneto-optical disc 기관 사출품의 구조를 보여준다.

그림 6은 사출 후 보압을 충분히 걸어준 경우의 대표적인 복굴절의 분포를 나타내고 있다. 지면 관계상 제시는 못하지만, 사출 후

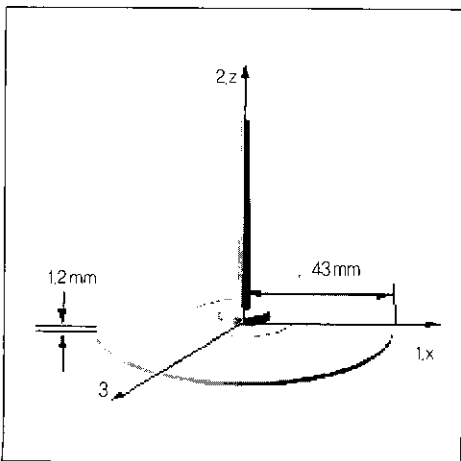


그림 5 MOD 사출품의 형상과 좌표계

보압이 안 걸린 단순사출성형의 경우와 사출 후 압축을 수반한 사출·압축성형의 경우는 이러한 복굴절 분포가 정성적으로 달라지게 된다는 것을 양지하기 바란다. 사출성형 공정조건에 따라 복굴절의 구조가 크게 변하므로 올바른 공정조건을 결정하는 작업이 매우 중요하다.

이러한 사출제품 내의 잔류 복굴절을 줄이기 위해서는 실험적인 방법에만 의존할 것이 아니라, 해석 시스템을 개발하여 복굴절의 분포를 예측할 수 있게 된다면 시행착오법이 아닌 과학적이고도 체계적인 사출·압축 성형공정기술법을 구축할 수 있을 것이다 따라서 정밀 광학 사출성형기술을 위해서 이러한 방향의 연구가 필수적이다.

정밀 사출성형의 수치해석

정밀광학 제품은 사출 속도, 사출 압력, 사출 온도, 금형 온도, 보압 정도 등 수많은 사출 성형공정 조건에 따라서 충전·보압 과정 그리고 냉각 과정 중에 재료의 유동과 열전달에 의한 냉각 및 유리화 과정에 영향을 받게 되고, 사출성형 후에도 재료의 변형 및 열적 변화에 따른 잔류응력, 복굴절, 뒤틀림 변형, 수축 등이 바뀌게 되며 이에 따라 최종 품질이 결정된다. 보통의 광학 사출제품의 잔류 응력과 복굴절은 유동에 의한 부분과 열에 의한 부분으로 나눌 수 있다. 그 중에서 열에 의한 잔류 응력과 유동에 의한 복굴절의 부분이 상당히 큰 비중이 차지

하고 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 인하여 광학 사출품의 수치해석 시스템은 유동에 의한 부분과 열에 의한 부분을 동시에 고려하여야 한다. 일반적으로 유동에 의한 잔류 응력과 복굴절을 제대로 고려하기 위해서는 유동상태의 재료에 대해서는 비선형 점탄성 구성 방정식 모델을 적용하여야 하며, 열에

의한 부분을 고려하기 위해서는 고체상태 재료의 선형 점탄성 모델, 자유 체적 이론, 광점탄성 이론 등을 도입하게 된다. 따라서 수치해석 시스템은 이러한 다양한 물리적 모델을 바탕으로 적절한 수치해석 기법을 도입해야 한다. 한편, 실험에 일치하는 결과를 예측하기 위해서는 여러가지 종류의 실험데이터를 바탕으로 정확한 물성 데이터가 필요하게 된다.

수치해석 시스템은 제품의 형상에 따라 2차원, 2.5차원 3차원 해석 시스템이 각각 개발되어야 한다. 예를 들면 CD, DVD 등의 원판 형상에 대해서는 2차원 해석 시스템을 이용하여야 하고, 볼록렌즈 등 비교적 납적한 제품에

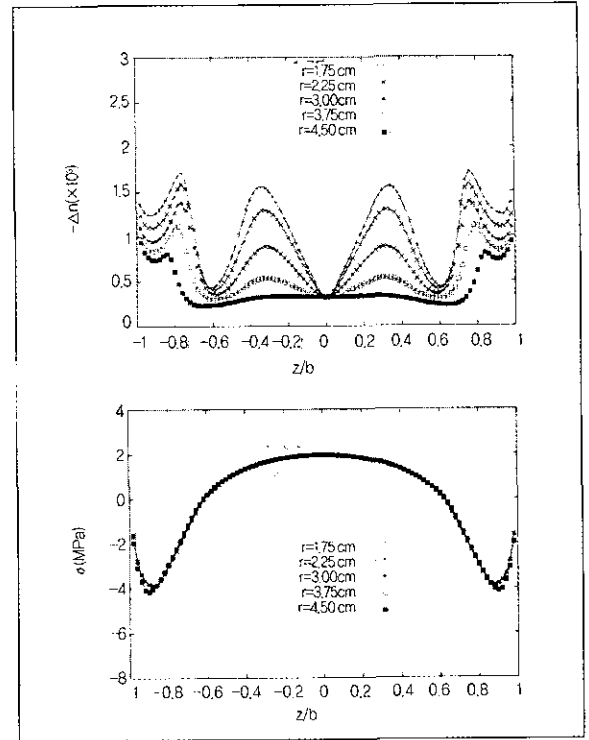


그림 7 복굴절 분포(위쪽), 잔류응력(아래쪽)

는 2.5차원 시스템을, 그리고 CD 플레이어의 픽업 렌즈는 3차원 해석 시스템을 각각 적용하여야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 포항공대 연구그룹에 의해 2차원과 2.5차원 해석 시스템은 개발이 거의 완성되었으며, 3차원 해석 시스템의 개발은 현재 진행 중이다.

2차원 수치해석

두께 2 mm와 반경 5.08 cm의 디스크 형상에 2차원 해석 시스템의 해석 결과로서 사출성형 공정후의 최종 제품에서 예측된 복굴절과 잔류 응력의 분포를 그림 7에서 보여 주고 있다.

상기의 복굴절 분포는 실험으로 구한 결과인 그림 6과 유사함

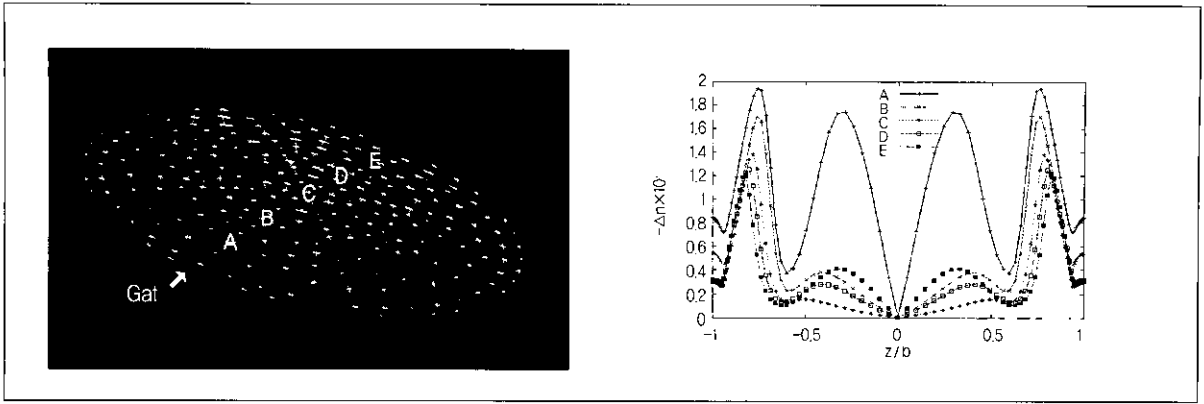


그림 8 볼록렌즈의 유한요소(왼쪽)와 복굴절 분포(오른쪽)

을 알 수 있고, 잔류응력분포는 실험 결과인 그림 2와 잘 맞는 것을 확인할 수 있다.

한편 사출·압축 성형의 경우 복굴절의 분포가 사출만으로 성형된 제품보다 상당히 낮아짐을 실험뿐만 아니라 수치해석적으로도 확인한 바 있다. 따라서 우수한 광학적 특성을 필요로 하는 제품에서는 사출·압축 성형이 더 용이함을 알 수 있다. 이에 반하여 잔류 응력의 분포에 있어서는 사출과 사출·압축 성형에 의한 결과가 거의 동일하게 예측되었다. 잔류 응력의 예측을 위해서는 먼저 실험을 통한 정확한 잔류 응력 계수와 플라스틱 재료의 자유 체적 이론의 올바른 거동에 대한 이해가 선행될 필요성이 있는 실정이다.

2.5차원 수치해석

렌즈 등의 복잡하지만 얇은 광학 사출품에 대한 잔류 응력과 복굴절 및 최종 제품의 변형에 대한 2.5차원 수치해석 시스템도 개발되었는데, 이는 기존의 상용 해석 시스템이 점성 모델에 바탕을 두고 해석하여 복굴절을 해석하지 못하는 한계를 극복한 것으로서

현재 많이 사용되는 얇은 광학 제품이나 부품의 잔류 응력과 복굴절 해석에 이용되면 상당한 영향을 줄 것으로 기대된다. 그림 8에서는 일례로 비구면 렌즈 형상과 지정된 다섯 지점에서의 두께 방향으로의 유통에 의한 복굴절의 분포를 보여 주고 있다. 이는 보압공정에 의한 안쪽의 정점과 충전 공정에 의한 바깥쪽 정점이 나타나는 대표적인 사출성형으로 인한 복굴절의 결과로 렌즈형상에서도 볼 수 있다.

3차원 수치해석

CD 플레이어에 사용되는 픽업 렌즈와 같이 길이에 대한 두께의 비가 크지 않은 복잡한 삼차원 형상에 대하여는 완전 3차원 해석이 필요로 하게 된다. 아직까지는 점성 모델에 바탕을 둔 3차원 충전 해석 시스템의 개발정도만 거의 완성되었으며, 점탄성 모델링 등 상기의 2차원과 2.5차원에 도입된 물리적 모델링을 도입하는 해석 시스템의 개발은 아직 진행 중이다. 앞으로 이러한 해석시스템이 개발되고, 컴퓨터의 용량도 발전하면 3차원 해석 시스템이 유용하게 될 날이 올 것으로 기대

하고 있다.

맺음말

광학 제품에 대한 플라스틱의 적용은 점차 그 범위를 넓혀가고 있다. 특히 IT 산업과 MEMS 기술의 발전과 함께 각종의 새로운 플라스틱 광학부품이 개발되고 있다. 이러한 경향은 새로운 고분자 재료의 개발을 요구하고 있으며, 신소재로서의 플라스틱 재료의 개발과 더불어 더욱 심화되고 있다. 이러한 고부가가치의 플라스틱 광학제품의 대량 생산기술로서 정밀사출성형공정은 점점 그 중요성이 부각되고 있으며, 선진 각 국에서도 연구개발 대상이 되고 있다. 이러한 연구 개발 노력이 있어서 기계공학 분야와 밀접하게 관계된 것으로서는 금형 가공 기술의 개발, 사출성형 CAE 해석 및 금형설계 시스템 개발, 정밀 제어 사출 성형기의 개발, 초정밀 측정법의 개발 등을 나열할 수 있다. 제품의 요구 정밀도가 높아지고 있기 때문에 최종 제품의 기계적, 광학적 성능의 향상을 위한 관련 기계공학 분야의 연구가 필수적이라 생각한다.