

# 비구면렌즈의 설계 및 초정밀가공(1)

## Design and Ultraprecision Machining of Aspheric Lens

金 政 斗\*  
Kim, Jeong Du

### 1. 머리말

비구면 광학계는 설계 및 제작상의 어려움으로 인하여 고정도급인 천문학, 군용, 특수한 측정기, 일부 고가인 사진 렌즈 이외 대부분 그의 응용이 억제되어 왔으며, 저 정도급에서는 카메라, 프로젝터용 등으로 그의 사용이 극히 제한되었고, 최근 난시용 안경 렌즈로 관심의 대상이 되고 있다.

최근에 와서 비구면 렌즈에 대한 중요성을 갖는 이유는 축대칭성을 갖고, 단면형상이 가끔 다항식으로 나타나는 곡면을 갖는 렌즈로, 종래의 구면만으로 구성된 광학계로는 보정될 수 없는 제수차를 근본적으로 제거 하는데 유용하기 때문이다.

비구면의 도입으로 얻는 장점으로는 물론 화질의 향상과 구면에 비하여 렌즈 매수의 절감, 렌즈 전체 형상의 콤팩트화, 중량 경감 등의 장점이 있다.

비구면 렌즈가 민생용으로 대량 생산된 것은 코닥 디스크 카메라가 그 시초라고 볼수 있으며, 디스크 카메라의 비구면 렌즈는 종래의 연마법에 비하여 새롭게 개발된 무기 유리를 소재로 하는 정밀 몰드 기술에 의한 것으로, 이것이 광학 산업에 미친 영향은 지대하다.

광학 렌즈의 곡면이 압도적인 비율로 구면으로 사용되는 이유는 연마가 용이하고, 고정도를 얻기가 쉽기 때문이다. 근년 비구면 렌즈

에 적지 않은 관심이 모아지고 있는 그 배경에는 수치제어를 이용한 레이저 측정기에 근거한 초정밀 가공기술, 연마에 의존하지 않는 렌즈의 정밀몰드 프로세스 기술 등에 그 초점이 맞추어 지고 있다.

즉, 비구면가공의 대량생산시에는 금형 가공의 필요성, 소량 및 특수 가공시에는 정밀가공, 생산성 및 경제성에 부합되는 가공법이 요구되며, 그의 개발방향은 그림 1과 같다.

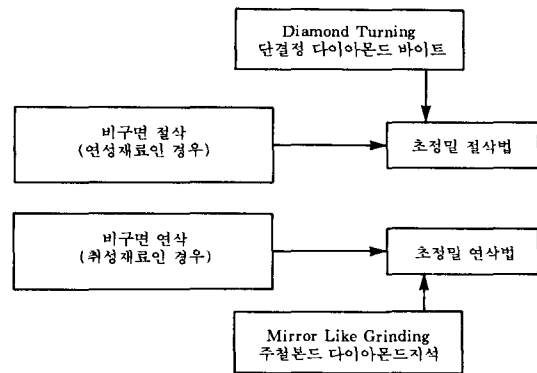


그림 1 비구면의 새로운 가공법

### 2. 비구면의 응용

無收差의 경우, 렌즈계를 통과한 광선은 1점으로 모인다. 이것을 波面이라고 생각하면, 波面은 광선에 직교하는 곡면이기 때문에 구면과

\* 機械製作技術士, 工學博士, KAIST 精密工學科 教授

라는 것이 된다. 收差가 있는 경우에는 파면 형상이 구면에서 약간 벗어난다. 즉, 그림 2에서 보는 바와 같이 수차가 없는 광학계의 파면은 球面이고, 수차가 있는 광학계는 非球面이다.

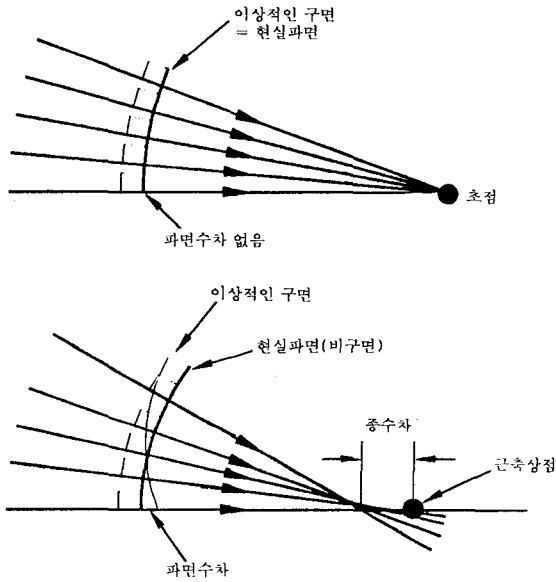


그림 2 수차유무에 의한 광선의 파면

收差가 없는 광학계 파면의 이상적인 구면과 현실 파면과의 차를 波面收差(Wavefront aberration)라고 한다. 파면 수차는 참조 구면에 따라 초점의 위치를 어디에 설정할지를 결정한다. 항상 참조 구면의 중심은 초점 위치에 있기 때문이다. 기본적으로 진공중의 광속을  $c = 3 \times 10^{10}$  cm/sec라고 하면 굴절율  $n$ 인 매질중의 광속도는  $c/n$ 이 된다. 공기의 굴절율은 1이기 때문에 공기중과 진공중의 광속은 거의 차이가 없다. 굴절율  $n = 1.5$ 로서 유리중의 광속은  $3 \times 10^{10} \div 1.5 = 2 \times 10^{10}$  cm가 된다.

비구면에 의한 수차의 보정이란, 유리중에 광속도가 지연되는 현상을 이용한다. 또 빛이 두께  $d$ 인 유리를 통과하는데

$$d \div \left(\frac{c}{n}\right) = \frac{nd}{c} \text{ Sec}$$

를 요하며, 같은 시간내에 공기중을

$$C \times \left(\frac{nd}{c}\right) = nd \text{ cm}$$

진행한다.

따라서 최초 동일 파면으로부터 출발한다고 하면 빛이 두께  $d$ 의 유리판을 통과하여 끝난 시점으로 공기중을 진행시킨 광파의 사이에

파면지연 =  $nd - d = (n-1)d \dots \dots (1)$ 의 위상차를 발생한다. 즉 공기 대신에 유리를 광이 통과하는 것에 따라 그 두께에  $(n-1)$ 을 곱한 만큼의 파면 지연을 발생한다. 이것을 이용한 수차의 보정이 가능하다.

즉 그림 3에서 보는바와 같이 광학계의 수차로 인하여 비구면화된 파면에 비구면화된 유리판을 삽입하여 파면을 다시 되돌리는 것이 기본적인 방법이다.

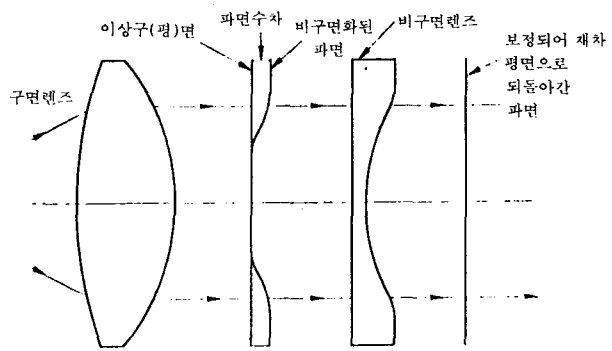


그림 3 비구면 렌즈에 의한 파면수차의 보정

또, 파면의 비구면 형상과 보정유리판의 비구면형상은 완전히 같지 않다. 식(1)을 적용하여 파면수차와 같은 파면의 지연을 발생시키지 않아야 하기 때문에 렌즈측의 비구면도는 파면수차의 비구면도  $1/(n-1)$ 배로 확대된 것이다.

가. 슈미트 카메라

얇은 렌즈에 붙은 구면수차를 보정하는데에

비구면은 대단히 유효하다. 그러나 구면수차는 그것만의 단독으로 나타난다고는 할 수 없다. 유효광속이 각종의 주광선에 대하여 모두 대칭 분포를 하도록 조리개를 배치할 수 있다면 당연히 非点收差라는 비대칭수차는 소멸하고 구면수차만이 남는다. 만약 이와같은 조리개 위치에 비구면렌즈를 설치하는 것이 가능하다면 잔류구면 수차도 완전히 제거할 수 있다.

이때 만약 비구면 렌즈의 위치가 조리개 위치에서 떨어져 있으면, 그에 따라 새로운 비대칭 수차가 발생한다. 이 조리개 위치에 비구면 보정판을 놓는 그 일례가 그림 4와 같은 Schmidt Camera이다. 주경을 구면경으로, 이것에서 발생하는 구면수차는 구면경의 곡률 중심의 위치에 비구면 보정판을 배치하는 것으로 제거하고 있다.

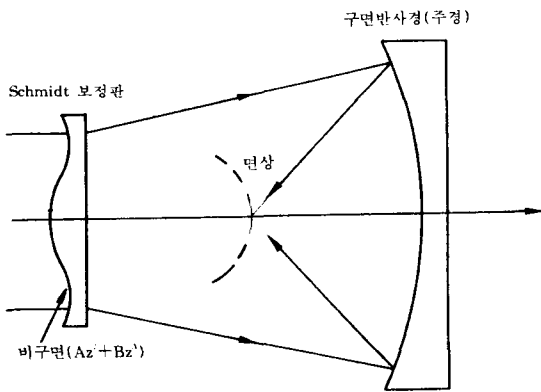


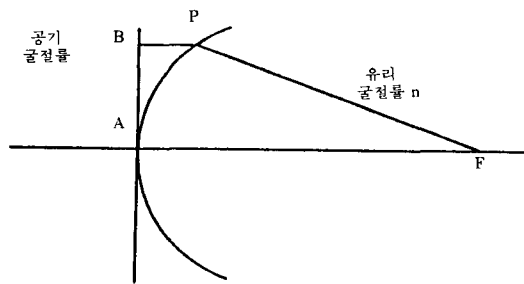
그림 4 슈미트 카메라의 광학계

#### 나. 2차 곡면을 이용한 축상무수차 렌즈

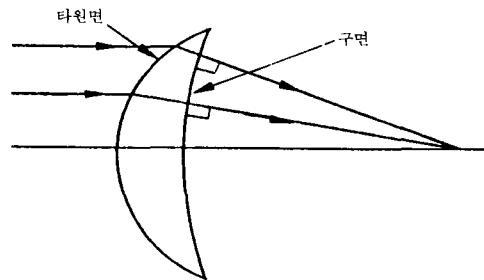
비구면 렌즈는 구면렌즈로 발생된 수차를 보정하는데 유효하다는 것을 알았지만 일보전진하여 비구면을 전제로 수차가 없는 렌즈를 설계하려는 방법, 즉 2차 곡선을 사용하는 것이다. 렌즈가 이상적인 결상을 행할 경우 입사파면상의 각점으로부터 초점까지의 광로길이(기하학적 길이  $d$ 에 굴절률  $n$ 을 곱한 것)는 모두 같다. 2차 곡면 광학은 가장 기본적인 타원의

정리로부터 도출되지만 구면수차가 제거되는 간단한 예를 그림 5와 같이 타원면-구면렌즈의 일례로 설명한다.

즉 무한속의 물체에 대하여 구면수차가 없으며, 공기·유리의 굴절면에서 광선군 모두에 직교하는 구면을 제2면으로 설정하면 초점  $F$ 는 공기중에 도출되어 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 제1면은 블록의 타원면, 제2면은 오목의 구면으로 완전히 구면수차가 없는 렌즈가 된다.



(a) 타원면에 의한 구면수차의 제거



(b) 구면수차가 없는 타원면-구면렌즈

그림 5 타원면에서 구면수차가 제거된 렌즈

#### 다. CD 용 Pick-up 광학계

그림 6은 CD 용 Pick-up 광학계의 각 방식을 나타낸 것이다. 2체형으로 종래 3매 사용하던 대물렌즈를 비구면 플라스틱 렌즈화 한 것이 현재 실용화 되고 있다. 그러나 플라스틱 렌즈는 온도나 습도에 따른 초점거리의 변동이나 렌즈 성능 변동이라는 재료 고유의 약점이 있

다. CD 플레이어용 대물렌즈는 자동 초점이 움직이고, 이들 변동을 다소 보정할 수 있지만, 초점거리 변동이 허용되지 않는 집광렌즈의 프라스틱화는 곤란하다. 또 환경이 엄격한 경우와 고신뢰성을 요구하는 데이터 기록용 디스크 장치등에는 프라스틱 대물렌즈의 채용은 어렵다고 생각된다.

따라서 신뢰성과 양산성의 양면으로 볼때 유리렌즈 기술이 주목되어 왔다. 2체형의 제작은 집광렌즈를 편면 비구면의 몰드에 의하여 제작되고 있다.

일반적으로 사용되는 CD 플레이어용의 집광렌즈는 NA가 0.14 정도로 작고, 따라서 비구면도나 요구된 형상정도 범위도 크기 때문에 제작은 비교적 용이하다고 생각된다.

### 3. 비구면 렌즈의 고정도 몰딩 성형

#### 가. 고정도 몰드 렌즈의 원리

고정도 몰드 렌즈의 원리는 정확한 형상정도를 갖고 있으며, 또한 광학적 면조도를 갖는 금형을 만들어, 형상, 면조도를 유리면에 전사하는 것이다.

그렇지만 고온에 정확한 금형이 전사되었다 하여도 상온상에 냉각된 유리면은 금형과 동일한 형상을 갖고 있지 않는 것이 보통이다. 통상 유리의 프레스는 비교적 저 점성으로 행하여지며, 용융된 유리를 직접 프레스 하여 병과 식기를 만드는 경우 유리의 점성은  $10^2 \sim 10^3 P$ 로, 금형온도는  $300 \sim 400^\circ C$ , 프레스시간  $2 \sim 3 S$ , 압력  $1.5 kgf/cm^2$ 로 이루어진다. 광학유리의 절단품을 가열하여 프레스 하는 경우는 점성  $10^5 P$ , 프레스시간  $4 \sim 5 S$ ,  $3 kgf/cm^2$ 의 압력으로 미친다. 양장의 경우, 유리의 온도와 금형온도에는  $700^\circ C$ 에서  $400^\circ C$ 의 온도차이가 존재한다.

따라서 프레스의 내부와 표면에는 온도차가 존재하여 냉각후에는 수축변형을 발생한다. 이것은 유리의 프레스 가공품 시 형상정도가 낮아지는 원인이다.

방식	렌즈 매수	구	성
2체형	5	연마구면 유리렌즈의 조합	
2체형	3	대물렌즈가 양면비구면 프라스틱 렌즈	
2체형	4	집광렌즈가 편면 비구면 유리렌즈	
2체형	3	대물렌즈가 편면 비구면 유리렌즈	
1체형	4	연마구면 유리렌즈의 조합된 1체형	
완전 1체형	1	양면 비구면 유리렌즈가 1매인 완전 1체형	

그림 6 CD용 Pick-Up 렌즈의 각종 방식

고정도 프레스는 위의 조건과는 완전히 다른 조건으로 프레스 된다. 유리점성은  $10^8 \sim 10^{12} P$ , 금형의 온도는  $500 \sim 650^\circ C$ , 프레스시간  $20 S$  이상, 프레스 압력  $20 \sim 80 kgf/cm^2$ 이다. 이것은 금형형상을 유리제품에 동일 형상으로 전사하려면 수축변형을 없애는 것이 필요한 것을 발견하였다. 금형온도와 유리 온도를 동일하게 하여, 유리 내부와 표면온도를 일정하게 하고, 온도분포를 균일하게 함으로서 프레스품의 형상정도를  $0.1 mm$ 에서  $0.01 mm$ 로 개선되었다. 연마품과 같은 표면형상, 면조도의 프레스품을 얻으려면 금형의 형상정도를 보다 높고 면조도를 보다 적게하여, 금형의 형상정도, 면조도를 유리표면에 전사시키면 된다.

#### 나. 몰드유리 렌즈의 생산공정

그림 7은 렌즈의 생산공정과 요소기술 전체

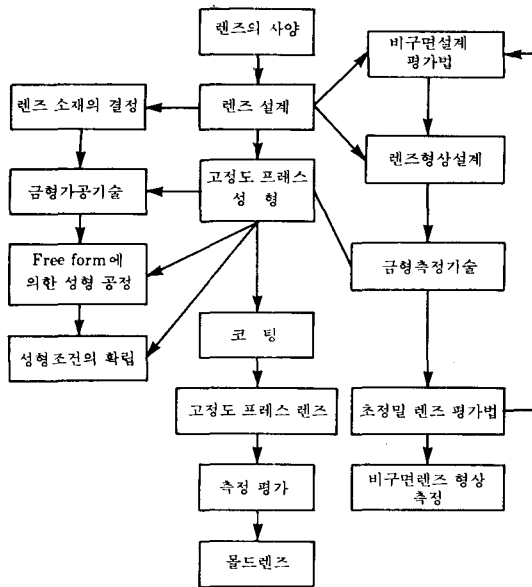


그림 7 렌즈의 생산공정

각 요소기술에서 생산기술상 가능한 기술로 높인다. 이러한 요구기술의 집약 결과로는 금형이나 렌즈의 측정에는 평가기술이 함께 필요하다. 경우에 따라서는 측정결과로부터 공차해석을 시뮬레이션하여 금형가공, 성형기로의 가공안내정보와 고도의 생산시스템을 확립시킨다.

#### 다. 광학재료

광학부품을 용도 및 정도로 분류하면 표1 및 표2와 같이 분류된다. 즉 광학부품용 용도는 초고정도 부품에서 저정도 부품까지 형상정도의 단계별에 따라 분류되고 있고 현상의 광학부품의 정도는 거의 이 계급에 대응시킬 수 있다.

이들 광학부품에 사용되는 재료는 저정도 부품에서 중정도부품(형상정도  $1\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ )의 범위에 있어서는 플라스틱 재료가 유리하고 함께

의 관계를 나타낸 것이다. 이러한 요소기술 확립을 해결하기 위한 기술과제로 금형가공기술의 확립, 금형용 박막기술의 확립, 성형법 확립, 비구면 설계, 측정기술과 평가법의 확립 등으로 종래기술의 연장 선상이 아닌 새로운 공법의 기술로 타파하여야 한다. 여기에 초정밀 금형가공 정도와 표면성상, 박막재료의 검토 및 열적 화학반응, 수축변형 방지를 위한 가열 성형법 등의 기초적 과제를 충분히 파악하고,

<표 1> 비구면 렌즈의 용도별 분류

분 류	용 도
-회전 대칭성이 있는 곡면 순수회전 2차 곡면 변형회전 2차 곡면 슈미트 보정판	체온계 렌즈, CD, 픽업 렌즈, 투사텔레비전 렌즈 슈미트 카메라
-2개의 대칭면을 갖는 곡면	난시용 안경, 레이저프린터
-완전히 대칭성이 없는 곡면	컬러브라운관, 노광보정렌즈

<표 2> 비구면렌즈의 형상정도 분류에 의한 각부의 요구정도

용 도	최고정도		고정도	중정도	저정도
	C	D			
형상정도	0.2 $\mu\text{m}$ 이내		0.3~1 $\mu\text{m}$	1~5 $\mu\text{m}$	6~100 $\mu\text{m}$
FIGURE (F)	0.1 $\mu\text{m}$		0.3~1 $\mu\text{m}$	-	-
ACCURACY (A)	$\pm 0.025\mu\text{m}$		$\pm 0.15\mu\text{m}$	-	-
ROUGHNESS(S)	1/5000 Rad		-	-	-
렌즈외경	10 $\phi$ 이하		10 $\phi$ 이상 40 $\phi$ 이하	-	-
외경정도	$\pm 10\mu\text{m}$		30~50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$ 이하	-
중심두께정도	$\pm 15\mu\text{m}$		$\pm 30\mu\text{m}$	$\pm 100\mu\text{m}$	-
굴절율오차	$5 \times 10^{-6}$		$5 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$	-
파면수차치	0.025 $\lambda$		0.04 $\lambda$	-	-
DECENTER	10 $\mu\text{m}$ 이내		10 $\mu\text{m}$ 이내	-	-
TILT	60°이내		60°이내	-	-

대단히 많이 사용될 수 있게 되었다. 동시에 고정도 부품 유리에도 CD용 프라스틱 대물렌즈나 굴절을 분포형 렌즈(GRIN)의 새로운 광학재료 등이 현존하고 있지만 저정도 부품 등에 볼 수 있는 물량은 나타나 있지 않다. 여기에서 광학재료로 프라스틱과 광학유리를 비교검토한 경우 프라스틱을 이용한 렌즈의 특징은 다음과 같다.

- ① 경량화에 도움을 준다.
- ② 충격성이 높다.
- ③ 연마를 필요로하지 않기 때문에 가격이 저렴하다.
- ④ 비구면 렌즈의 양산화가 가능하다.

그러나 반면에 재료로서의 문제점도 많다.

- ① 내열성이 낮다.
- ② 온도에 의한 광학 항수 변화
- ③ 흡수성이 크다.
- ④ 로드간의 균질성 및 동일로드로의 부분적인 불균질이 나타난다.
- ⑤ 복굴절이 크다.
- ⑥ 유리보다 굴절율, 분산등의 다른 다품

질 재료는 얻을 수 없기 때문에 설계상의 선택은 한정되어 있다.

표3에 대표적인 광학유리와 PMMA, PC, PS, CR39의 물성치를 나타내고 있으며 중요한 것은 사용목적에 알맞는 재료의 선정이고 굴절율, 분산, 온도변화에 따른 굴절율의 변동, 복굴절성의 광학 특성등이 중요하다.

표4는 CD용 대물렌즈의 광학 성능 및 형상 정도로서, 양면이 고정도인 비구면형상으로, Figure 량이 0.1 $\mu$ m 이하의 정도이며, Accuracy

〈표 4〉 CD용 대물렌즈의 광학성능 및 형상정도

파면수차	<0.056 $\lambda$ (rms)
굴절율	$\pm 0.00030$
복굴절율	<5nm/cm
외경	$\pm 0.005$ mm
중심살두께	$\pm 0.015$ mm
비구면정도	
Figure error	<0.1 $\mu$ m
Accuracy	<0.04 $\mu$ m
표면거칠기	<200Å Rmax

〈표 3〉 광학유리와 프라스틱 소재의 물성치

항 목		물 성				
		Glass	PMMA	PC	PS	CR39
광학적 성질	굴절율(20℃)	1.51 $\pm$ 0.0005	1.492 $\pm$ 0.003	1.586 $\pm$ 0.003	1.592 $\pm$ 0.003	1.504 $\pm$ 0.003
	분산	59	58	31	31	58
	굴절율의 온도변화/℃	-0.000001	-0.00012	-0.00014	-0.00015	
	복굴절성	근소	소	대	대	
	외부투과율	98%	92%	89%	88%	
기계적 성질	인장강도(kg/cm <sup>2</sup> )	400~1000	560~700	590~660	350~630	350~420
	탄성율(10kg/cm <sup>2</sup> )	50~90	2.5~3.5	2.2~2.5	2.8~4.2	2.1
	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )	6000~12000	775~1350	773	810~1220	1580
	충격강도(kg/cm <sup>2</sup> )	-	2.2~2.8	80~100	1.4~2.8	
	로크웰경도	약 6도(Mohr)	M80~M100	M70~M118	M65~M90	M100
	굽힘강도(kg/cm <sup>2</sup> )	450~850	850~1200	773~914	560~1120	635
열적 성질	열변형온도/℃	545	65~100	120~140	70~100	140
	열전도율 10 <sup>-4</sup> cal/sec℃cm	23	4~6	4.5	2.4~3.3	
	비열 cal/℃·g	0.2	0.35	0.3	0.32	0.55
	선 팽창계수/℃	10 $\times$ 10 <sup>-6</sup>	70 $\times$ 10 <sup>-6</sup>	70 $\times$ 10 <sup>-6</sup>	80 $\times$ 10 <sup>-6</sup>	117 $\times$ 10 <sup>-6</sup>
	비 중	2.5	1.19	1.20	1.06	1.32
포화흡수율 %		점	2.0	0.4	0.1	

량이  $0.04\mu\text{m}$ 의 결과 파면수차치 RMS는  $0.056\lambda$ 이다.

그림 8은 외경 30mm, 두께 5mm이하, 비구면 량  $3\mu\text{m}$ 의 비구면-구면 렌즈가 유리에 의하여 프레스된 비구면 형상을 나타낸 것이다. 그림 9는 편면 비구면 렌즈의 형상 정도를 나타낸 것으로서 그의 평가는 Figure, Accuracy,

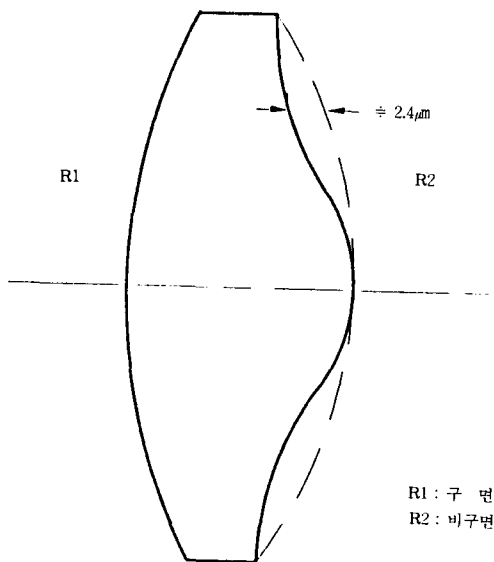


그림 8 카메라용 편면비구면렌즈

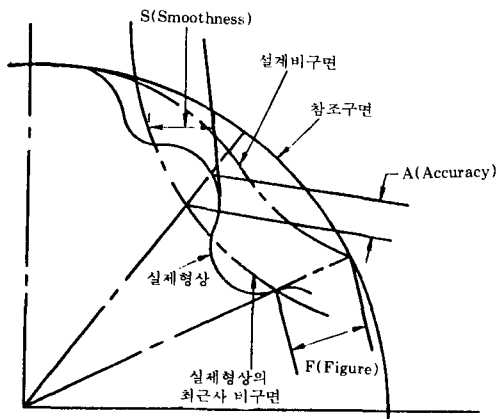


그림 9 비구면 형상 정도의 표시방법

Smoothness로 나타난다. 표 5는 유리 프레스에 의한 비구면 렌즈의 광학 성능 및 형상 정도를 나타낸 것으로 유효경 최외경에 대하여 Figure  $0.6\mu\text{m}$ , Accuracy  $0.04\mu\text{m}$ , 표면거칠기  $200\text{\AA}$ , 편심  $75''$ 의 정도를 얻을 수 있다.

라. 비구면 형상 측정과 평가

비구면 측정에 있어서 기본적인 측정 수단을 검토할 경우 몰드 성형에는 2개의 사용 목적

<표 5> 유리프레스에 의한 비구면 렌즈의 광학 성능 및 형상 정도

	렌즈사양	프레스 결과
굴절율	$\pm 0.00030$	$\pm 0.00030$
복굴절(nm/cm)	$< 5$	$< 5$
외경(mm)	$\pm 0.01$	$\pm 0.005$
중심살 두께(mm)	$\pm 0.04$	$\pm 0.03$
구면정도:		
Power( $\mu\text{m}$ )	$< 1.2$	$< 0.6$
Irregularity( $\mu\text{m}$ )	$< 0.15$	$< 0.06$
비구면정도:		
Figure error( $\mu\text{m}$ )	$< 1.0$	$< 0.6$
Accuracy error( $\mu\text{m}$ )	$< 1.0$	$< 0.04$
편심( $''$ )	$< 50$	$< 75$
표면거칠기( $\text{\AA}$ Rmax)	$< 100$	$< 200$

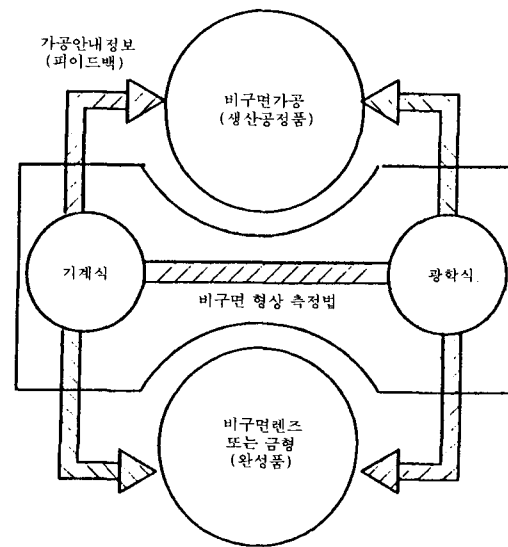


그림 10 비구면 형상의 가공 및 측정 시스템

즉, 비구면 형상의 렌즈 및 금형의 완성품 측정, 생산공정에서의 금형의 비구면 측정을 분명히 하여야 한다.

이러한 측정목적으로 부터 측정기는 검토되지만 측정되는 비구면의 구체적인 조건에 구경(口徑), 재질, 기준, 곡률반경, 비구면량 등으로 결정된다.

금형의 생산 공정중의 측정 시에는 그림 10에서 보는 바와 같이 표면성상, 표면의 광학적 반사율 등의 조건으로부터 기계식 측정법(측침식)이나 광학식 측정법(간섭법) 등의 측정기를 구분하여 사용 또는 동시 병행하면서 정도의 확인을 행한다.

#### 참고문헌

1. T.Maruyama, M.Takagi, Y.Noro, M.Masuda and H.Ohtsu, Zoom Lens Systems with Aspherical Plastic Lens, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. CE-33, No.3, 1987, pp 256-265.
2. S.M.Arnold and A.K.Jain, An Interferometer for Testing of General Aspherics using Computer Generated Holograms, SPIE, Vol. 1396, 1990, pp 473-480.
3. H.M.Pollicove and D.T.Moore, Automation in Optics Manufacturing, SPIE, Vol. 1354, 1990, pp 482-486.
4. D.E.Oinen and N.W.Billow, A New Approach to the Simulation of Optical Manufacturing Processes, SPIE, Vol. 1354, 1990, pp 487-493.
5. D.Chen and O.G.Ramer, Diffraction-Limited Geodesic Lens for Integrated Optic Circuit, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol QE-15, No.9, 1979.
6. M.Usuki and M.Yabuya, Ultra Precision Aspheric Generator, JSPE, Vol. 55, No.6, 1989, pp 967-971.
7. T.Izumitani, High Precision Moulding of Aspheric Glass Lenses, JSPE, Vol. 55, No. 6, 1989, pp 972-975.
8. K.Hirai, S.Nakamura, Y.Shirafuji and T. Murao, Molding-Die Machining Techniques for Aspheric Plastic Lenses, National Technical Report, Vol. 31, No. 5, 1985, pp 632-640.
9. A.K.Rigler and T.P.Vogl, Spline Functions : An Alternative Representation of Aspheric Surfaces, Applied Optics, Vol. 10, No. 7, 1971, pp 1648-1651.
10. H.Ohmori, Electrolytic In-Process Dressing (Elid) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining, International Journal of JSPE, Vol. 26, No. 4, 1992, pp 273-278.
11. G.Harbers and M.Struis, Measurement of Steep Aspheric Surfaces Using a Radial Shear Interferometer, Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology in Aachen, 1988, pp 317-334.
12. H.Tiziani, B.Packroß and G.Schmidt, Testing of Aspheric Surfaces with Computer Generated Holograms, Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology in Aachen, 1988, pp 335-342.
13. T.Pfeifer, P.Hantel and R.Tutsch, Synthetic Holograms for the Testing of Aspheric Surfaces, Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology in Aachen, 1988, pp 343-355.

〈다음호에 계속〉