

## 초소형 영상 전송 모듈용 DOE(Diffractive optical element) 렌즈의 설계 및 평가

이환선 · 임천석<sup>†</sup> · 조재홍 · 장 수

한남대학교 자연과학부 광 · 전자물리학 전공  
④ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133

김현규

국방과학연구소  
④ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 35-5호

(2001년 3월 9일 받음, 2001년 5월 11일 수정본 받음)

IMT2000용 단말기, 휴대용 개인정보단말기(PDA), 노트북 PC 등에 내장이 가능한 고속(f/2.2)의 1/7인치 CMOS칩용 초소형 카메라 렌즈를 설계하였다. 설계의 특징으로는 회절소자의 마이너스 고분산특성을 심분 활용하여 단매의 렌즈로도 고속 및 광화각에 걸쳐 고차수차 및 색수차를 충분히 보정한 것이고 동시에 경박단소화(렌즈포함 상거리 = 3.3 mm)도 실현한 것이다. 한편, 설계방법으로는 단매로도 최상의 성능을 확보하기 위해, 가능한 초기형상을(Seidel 3차 수차론 활용) 최적설계의 입력치로 두고 다양한 면배치에 대해 최적설계 후, 상호간의 광학성능 및 기타 특성치를 비교·분석하였다. 그리고 성능향상의 한 방법으로써 기존 단매 렌즈의 굴절능을 전체 (2매) 렌즈의 굴절능으로 하면서 petzval sum이 제로가 되도록 렌즈를 추가하였고, 이로 말미암아 최적설계 후 기존 광학성능을 크게 향상시킬 수 있었다.

분류코드 : IP.010, DL.010.

### I. 서 론

최근에 들어 회절면과 굴절면의 혼합면으로 구성된 하이브리드(hybrid) 타입의 렌즈에 대한 연구 및 실용화가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 보통 이와 같은 하이브리드 타입의 렌즈를 DOE 렌즈(Diffractive Optical Element)라 부르고 그 제작수법은 초정밀 CNC 선반과 다이아몬드 바이트에 의한 고정밀 도의 비구면 제조 기술을 기반으로 하고 있다. DOE 렌즈가 각광받는 이유는 회절면의 마이너스의 고분산특성<sup>[3]</sup>으로 인해 굴절렌즈와 일체형으로 구성할 경우 단매의 렌즈로도 색수차 보정이 가능하기 때문이다. 또, 추가적으로 회절면의 비구면 효과로 인해 고차의 수차보정도 가능하다. 그리고 종래 3매 또는 4매 이상의 글래스로 구성된 구면 굴절렌즈계로 가능한 성능을 단매의 DOE 렌즈(굴절면에 비구면 채용)로 달성할 수 있어 경박단소화가 가능하다. 한편, 생산적인 측면에서 보면 DOE 렌즈는 비구면 렌즈의 대량 제조법인 정밀 몰딩기술과 동일하므로, 산포가 적은 렌즈를 저가로 대량생산이 가능하다는 것을 장점으로 들 수 있다. 이미 다각도로 각종 광학기기 용 렌즈로써의 적용여부에 관해 시도되어지고 있고,<sup>[4,5]</sup> 일부는 DVD 픽업용 대물렌즈와 같이 이미 상용화가 된 것들도 있다. 그러나 휴대용 영상기기, 디지털 카메라, Head Up display, 레이저 현미경용 대물렌즈 등 다양한 광기기에 적용하려는 시도가 활발해질수록 DOE 렌즈의 단점 또한 크게 부각되고 있다. 그 대표적인 것이 회절효율의 형상의존성<sup>[6,7]</sup>과

파장의존성이다. 굴절광학계에서는 광학계에 입사한 광선은 광학계 표면에서의 반사 및 산란, 내부에서의 흡수와 산란을 제외하면 그의 전부가 스넬의 법칙에 따라 굴절된다. 그러나 회절광학계에서는 상기요인을 포함해도, 입사광의 에너지가 전부 출사광으로 변환되는 것이 아니고, 회절효율이라고 불리워지는 효율로 밖에 변환되지 않는다. 회절효율의 형상의존성은 일반적으로 회절렌즈에서 이상적인 형상인 kinoform 형상과 그것을 계단 근사한 형상으로 비교되고 있다. Kinoform 형상이란 톱니바퀴 모양의 형상이고 어떤 파장에서 최적화(블레이즈화)<sup>[8]</sup>되면, 그 파장에서 회절효율은 이론적으로는 100%가 된다(단, 박형근사 및 스칼라 회절이론인 경우). 그러나 이상적인 kinoform 형상은 제작이 곤란하기 때문에 이것을 계단근사한 형상도 사용되어지고 있다. 이때 회절효율은 계단근사의 차수가 작을수록 저하한다(계단의 수가 4, 6, 8이면 회절효율은 각각 81%, 95%, 99%이고, 이는 리소그래피기법이나 다이아몬드 터닝머신에 의해 가능하다). 한편 회절효율은 또한 파장에 크게 의존한다. 이것은 회절에 의한 렌즈작용이 회절파면의 위상함수에 의해서 결정되고, 이 위상은 기본적으로 매질의 굴절률과 광로차 및 파장의 함수로 결정되기 때문이다. 회절렌즈에서는 파장이 다르면 회절효율이 꽤 저하하고, 또 이 저하량은 회절광의 차수가 커질수록 증가하게 된다. 중요한 것은 바로 이것이 상면에서 플레어(flare, contrast 저하)와 색번짐(色付)의 원인으로 작용한다는 것이다. 또 이외에 몰딩방식에 의한 대량 생산 시 생길 수 있는 문제로 회절면의 형상구조 파괴 역시 상면에서의 결상성능 저하에 큰 영향을 미친다. 그러나 이와 같은 성능 저하 문제에도 불구하고 저가 및 경박

<sup>†</sup>E-mail: csrim@eve.hannam.ac.kr

단소화(특히, 초소형화)가 가능하다는 이유로 인하여 DOE의 적용시도는 계속되고 있고, 또 앞으로 하나의 중요한 결상소자로서 큰 역할을 할 것으로 예상되고 있다.

본 논문에서는 IMT2000 단말기, 휴대용 개인정보단말기(PDA, Personal Digital Assistant), 노트북 PC용 화상카메라 등에 사용될 수 있는 초소형 카메라에 대한 시장의 요구가 점점 높아지고 있는 점에 착안하여 단내의 렌즈로도 색수차 및 고차수차의 보정이 가능한 DOE 렌즈를 설계하고자 한다. 현재 초소형 카메라 시장은 CCD에 비해 소형화 및 소형 배터리로 장시간 사용 가능한 CMOS칩 쪽을 선호하고 있고(전력 소모량 CCD 대비 최대 1/5), 또 이의 급속한 성능향상에 힘입어 1/7 인치 CMOS모듈(렌즈와 CMOS칩)로 점점 전이되어 가고 있다. 그러므로 향후 시장요구에 대응 가능한 고속(f/2.2) 이면서 초소형(렌즈포함 상거리=3.3 mm)의 1/7 인치 CMOS 칩용 카메라 렌즈를 설계하고자 한다.

## II. 회절광학소자 이론

입사파면의 위상 또는 진폭을 조절하는 회절광학소자는 기본적으로 다음의 격자 방정식을 만족한다.<sup>[6,9]</sup>

$$n' \sin \theta' - n \sin \theta = \frac{m\lambda}{P} \quad (1)$$

여기서  $n'$ 은 출사면측의 굴절률,  $n$ 은 입사면측의 굴절률,  $\theta'$ 는 출사각,  $\theta$ 는 입사각,  $\lambda$ 는 입사광의 파장,  $m$ 은 회절차수, 그리고  $P$ 는 회절격자의 피치(pitch)로 회절면의 형상을 결정한다. 식 (1)을 사용하여 회절격자의 피치를 적절하게 설계하면, 이 회절격자는 렌즈 역할을 하게 된다(그림 1 참조). 일반적으로 회절렌즈의 설계법은 크게 두 가지로 나누어지는데 하나는 위상함수법이고, 다른 하나는 고굴절률법이다. 위상함수법은 회절파면의 위상함수로써 회절면을 표현하는 것으로 요즈음의 상용화된 대부분의 프로그램에서 채택하는 방법이다. 본 논문에서는 CODE-V를 사용하여 위상함수법으로 회절면을 설계한다. 그리고 고굴절률법 또는 Sweatt모델<sup>[10-14]</sup>이라고 부르는 설계법은 회절면을 굴절률이 아주 큰 얇은 박막(두께=0)으로 취

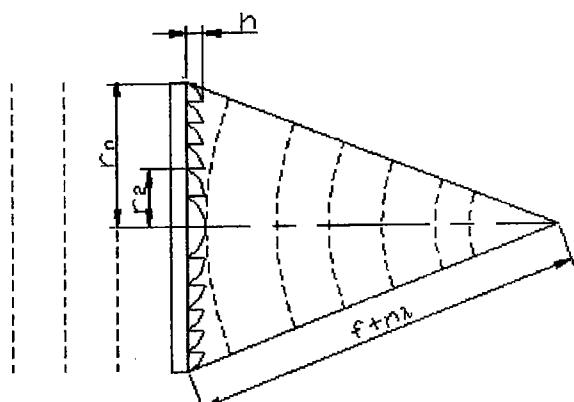


그림 1. 렌즈역할을 하는 위상형 회절소자의 개략도.

급한다. 이 방법은 회절렌즈에 대한 설계기능이 없는 기존의 렌즈설계 프로그램으로도 설계가 가능하고 회절렌즈를 굴절렌즈에 대응시켜 볼 수 있어 회절렌즈의 이해에 있어서 많은 도움을 준다. 고굴절률법에 있어서 회절파면의 위상함수와 회절 전·후의 회절 각은 다음 식 (2)로 표현되는 관계를 만족한다.

$$(n_u - 1) \frac{dz}{dr} = n' \sin \theta' - n \sin \theta \quad (2)$$

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2 r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} \quad (3)$$

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_u - 1)^* z(r) \quad (4)$$

여기서  $n_u$ 는 얇은 박막의 굴절률이고 기준파장에 있어서  $10^n + 1$ (통상  $n = 3\sim 5$ )로 표현되고, 각 파장별로는  $n_u(\lambda) = 1 + \text{Constant} \cdot \lambda$ 로 표현된다. 그리고 광축은 +Z방향이고  $z(r)$ 는 얇은 박막의 비구면 방정식(또는 회절파면의 방정식)으로  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 이며,  $\kappa$ 는 원주곡면계수이고,  $A, B, C, D$ 는 4차, 6차, 8차, 10차의 비구면 계수이다. 또, 식 (4)의  $\phi(r)$ 는 얇은 박막의 비구면 방정식과 회절파면의 위상방정식을 연결해 주는 표현식이다.

식 (1)과 식 (2)로부터 회절격자의 피치는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$(n_u - 1) \frac{dz}{dr} = m \frac{\lambda}{p} \quad (5)$$

즉 회절격자의 피치는 식 (3)으로 주어지는 비구면 방정식을 미분하여 구할 수 있다. 이와 같이 고굴절률법을 사용하면 회절렌즈를 통상의 비구면 렌즈와 같이 설계하고, 그 설계치로부터 회절렌즈의 피치를 계산할 수 있다.

회절광학소자는 크게 진폭형과 위상형으로 나눌 수 있는데, Fresnel zone plate와 같은 진폭형 소자의 경우는 약 34%의 회절효율을 가지지만, Fresnel 렌즈와 같은 톱니형태(kinoform)의 구조를 가지는 위상형 회절 소자의 경우는 특정파장에서 회절효율을 100%까지 높일 수 있다. 그러므로 일반적으로 광학소자로써의 활용성은 위상형 회절소자가 크며, 이런 위상형 회절소자에 있어서  $k$ (정수)번째 띠의 반경( $r_k$ ) 및 톱니의 최대 높이( $h_{max}$ )는 다음 식으로 주어진다(그림 1 참조).

$$r_k^2 = 2kf\lambda_0 + (k\lambda_0)^2 \approx 2kf\lambda_0 \quad (6)$$

$$h_{max} = \frac{m\lambda_0}{n(\lambda_0) - 1} \quad (7)$$

식 (7)에서  $m$ 은 회절차수,  $n$ 은 사용매질의 굴절률이다.

한편 회절렌즈의 회절효율이 파장에 크게 의존하는데, 이는 회절에 의한 렌즈작용이 위상함수에 의해 결정되고, 위상은 기본적으로 매질의 굴절률과 회절차수 및 파장의 함수로 결정되기 때문이다. 임의의 파장  $\lambda$ 에 대한 톱니형태의 회절렌즈의 회절효율( $e$ )은 다음과 같이 주어지고, 각 파장 및 회절차수( $m$ )에 따른 회절효율<sup>[8,15]</sup>을 계산하여 표 1에 제시하였다.

표 1. 파장 및 회절차수에 따른 회절효율 계산(단위 : %)

| 파장       | 회절차수 | 3차  | 2차   | 1차    | 0차  | -1차 | -2차 | -3차 |
|----------|------|-----|------|-------|-----|-----|-----|-----|
| 435.8 nm |      | 1.9 | 10.9 | 77.9  | 3.6 | 1.1 | 0.5 | 0.3 |
| 486.1 nm |      | 0.5 | 2.2  | 94.5  | 1.3 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |
| 546.1 nm |      | 0.0 | 0.0  | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 587.6 nm |      | 0.1 | 0.4  | 98.4  | 0.6 | 0.1 | 0.1 | 0.0 |
| 656.3 nm |      | 0.5 | 1.9  | 91.1  | 3.7 | 0.8 | 0.3 | 0.2 |

$$\varepsilon = \left[ \frac{\sin \pi m \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} - 1 \right\}}{\pi m \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} - 1 \right\}} \right]^2 \times 100 (\%) \quad (8)$$

식 (6)을 초점거리에 대해 정리하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$f = \frac{r_k^2}{2k\lambda} \quad (9)$$

그리고 이 식 (9)를  $\lambda$ 에 대해 미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{f}{\lambda} \quad (10)$$

또는

$$\frac{\Delta f}{f} = \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| \quad (11)$$

식 (11)은 파장에 따른 초점거리의 변화를 나타내는 관계식으로 우변을 흔히 분산이라고 하고, Abbe 수( $v_{dif}$ ) 또는 분산능(dispersive power)과는 역수관계에 있다.

$$v_{dif} = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = \frac{\lambda_d}{\lambda_s - \lambda_l} \quad (12)$$

여기서  $\lambda_d$ 는 설계중심파장이고,  $\lambda_s$ 는 사용파장 중 짧은쪽 파장이며,  $\lambda_l$ 은 긴쪽 파장이다.

가시광 영역에서의 Abbe 수( $v_{dif}$ ) 및 부분분산비( $P_{g,F}$ )를 구하면 다음과 같다.

$$v_{dif} = \frac{\lambda_d}{\lambda_s - \lambda_l} = \frac{587.6 \text{ mm}}{486.1 \text{ nm} - 656.3 \text{ nm}} = -3.45$$

$$P_{g,F} = \frac{\lambda_g - \lambda_F}{\lambda_F - \lambda_C} = \frac{435.8 \text{ nm} - 486.1 \text{ nm}}{486.1 \text{ nm} - 656.3 \text{ nm}} = 0.2956 \quad (13)$$

통상의 굴절렌즈의 Abbe 수( $v_{ref}$ )는 20~95 $^\circ$ 이고, 부분분산비( $P_{g,F}$ )는 0.53~0.63의 값을 갖는다. 이에 비해 회절렌즈는 식 (12)에서 계산한 것처럼 매우 큰 마이너스의 고분산특성을 갖고 있다. 그러므로 광학면을 굴절면과 회절면의 혼합면으로 구성하면 색수차를 보정 할 수 있게 된다.

동일면상에 회절면과 굴절면을 동시에 구성하는 경우 전체

굴절능( $K_{tot}$ )은 다음과 같이 주어진다.

$$K_{tot} = K_{ref} + K_{dif} \quad (14)$$

여기서  $K_{ref}$ 은 굴절소자의 굴절능,  $K_{dif}$ 는 회절소자의 굴절능이다.

그리고 회절 및 굴절면의 혼합면으로 구성된 하이브리드 렌즈에 있어서 몰색화 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$K_{ref} = \frac{v_{ref}}{v_{ref} - v_{dif}} K_{tot}$$

$$K_{dif} = \frac{v_{dif}}{v_{dif} - v_{ref}} K_{tot} \quad (15)$$

앞에서 언급한 것처럼 회절렌즈의 설계법으로써 위상함수법을 사용하는 경우 회절파면의 위상방정식은 다음과 같다.

$$\Phi(r) = m \frac{2\pi}{\lambda_0} (C_1 r^2 + C_2 r^4 + C_3 r^6 + \dots)$$

$$= m \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum C_n r^{2n} \quad (16)$$

여기서,  $\lambda_0$ 는 설계중심파장이고,  $C_1(\propto -1/f)$ ,  $C_2(\propto 1/f^3)$ ,  $C_3(\propto 1/f^5)$ 은 위상계수, 그리고  $m$ 은 회절차수이다. 이때 회절소자의 굴절능은 다음 식으로 주어진다.

$$K_{dif} = -2C_1 \frac{m\lambda}{\lambda_0} \quad (17)$$

그리고 띠의 반경은 광로차가 설계중심파장( $\lambda_0$ )의 정수배( $k$ )만큼 차이가 나도록 결정한다(식 (18)참조).

$$k\lambda_0 = m \sum C_n r^{2n} \quad (18)$$

띠의 최대수는 다음식 (19)로 결정한다.

$$N_{max} = m \left( \frac{1}{\lambda_0} \right) \sum C_n r_{max}^{2n} \quad (19)$$

추가적으로 본 논문에서 사용한 굴절면의 방정식은 다음과 같이 표현되는 공축비구면(또는 광축에 대한 회전대칭형 비구면)이고, 식 (20)에 제시한다.

$$Z = \frac{CY^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)C^2 Y^2}} + AY^4 + BY^6 + CY^8 + DY^{10} \quad (20)$$

여기서,  $C$ 는 중심곡률,  $\kappa$ 는 원추곡면계수(conic constant), 그리고  $A, B, C, D$ 는 각각 4차, 6차, 8차, 10차의 비구면 계수로, 원추곡면계수  $\kappa$ 에 따라 굴절면의 형태가 결정된다. 즉,  $\kappa$ 가 0이면 구면,  $-1 < \kappa < 0$ 의 값을 가지면 타원면,  $\kappa$ 가  $-1$ 이면 포물면,  $\kappa < -1$ 일 때는 쌍곡면의 형태를 가진다.

### III. 최적설계(Optimization)를 위한 기초 설계

#### 3.1 코마 및 비점수차가 제거되고 구면수차가 보정된 초기형상 결정

일반적으로 광학설계는 크게 일곱 단계로 나누어 볼 수 있

다. 먼저 설계대상에 관해 설계 의뢰자와 설계사양(스페)의 결정에 관해 협의하고, 이 협의를 바탕으로 설계대상이 되는 광학기기의 전체적인 그림 즉, 광로도를 그려본다. 이때 광학기기를 꾸미기 위해 필요한 각종 부품들을 조사하고 각 부품들의 특성, 조립, 위치 등에 관해 개략적인 결정을 한다. 광로도 설계가 끝이 나면 광학기기를 기능별로 모듈화해서 각 모듈에 대한 기초설계를 진행한다. 각 부품별로 기초설계 후 기초설계치를 원하는 광학사양에 만족시키기 위해 최적설계 및 광학 성능 평가를 실시한다. 보통 최적설계는 CODE-V, OSLO, ZMAX등 설계자의 필요에 따라 선택하게 된다. 최적설계된 렌즈 및 광학부품(광학 기구물 포함)은 가공특성, 조립특성, 양산특성, 환경특성 등 제품화 단계에서 문제가 될 수 있는 각종 항목에 대해 공차계산을 하게 된다. 보통 공차계산 시 큰 문제없는 렌즈를 얻기 위해 설계자의 경험적인 부분이 많이 포함된다. 공차계산이 끝나면 각 부품별 제작을 해야 하므로 설계도면을 작성하고 시 가공을 하게 된다. 여기서 설계도면은 각 부품별 치수, 광학특성, 측정 및 평가방법, 가공 또는 조립시의 주의점 등 다양한 정보를 필요로 한다. 제작 완료된 광학부품은 광학설계에 있어서의 마지막 단계인 단품 및 조립 후 측정/평가작업을 수행하게 된다. 이 단계에서는 종합적인 평가가 필요하고 결과에 대해서는 다시 피드백시켜 제작의 완성도를 높여 나간다.

위에서 설명한 광학설계 단계 중 최종설계의 성공여부를 좌우하고, 또 설계자의 아이디어를 가장 많이 필요로 하는 중요한 단계인 기초설계에 관해 설명하고자 한다. 최적화를 위한 초기설계 데이터로써 초기 입력치를 결정하는 방법은 다양하게 제시되어지고 있으나, 그 중에서 가장 합리적인 방법으로 생각되어지는 것이 Seidel 3차 수차이론을 활용하는 것이다. Seidel 3차 수차이론으로부터 수차들은 설계변수들을 사용하여 수치 해석적으로 표현하는 것이 가능하고, 또 설계시의 각종 제한조건들(constraints:초점거리, 전장길이, 배율 등)도 역시 해석적으로 표현 가능하다. 이렇게 표현된 해석적인식들과 설계변수들과의 관계를 적절히 이용하여 원하는 초기 설계치를 얻는 것이 기초설계이다. 기초설계의 가장 큰 의미는 렌즈의 형상을 결정하는 것이라고 강조하고 싶다.

본 논문에서 설계하고자 하는 렌즈는 전장길이(렌즈 첫면에서 상면까지 거리)가 3.3 mm인 초소형 렌즈이고, 또 더군다나 광화각 및 고속에서 화상결상을 해야 하므로 다음과 같은 설계 아이디어에서 출발하고자 한다.<sup>[16~18]</sup> 먼저 1매 구성의 결상 렌즈이므로 (유효)설계 자유변수는 곡률 2개와 조리개(stop) 위치로 총 3개이다. 이 중 곡률 하나는 초점거리(또는 f#)를 만족시키기 위해 필요하고 조리개 위치는 코마수차를 제거하기 위해 필요하다. 그러므로 하나의 자유변수만 남게 되는데 본 논문에서는 비점수차가 제거되는 해를 얻고자 한다. 왜냐하면 카메라 렌즈와 같이 광화각을 필요로 하는 렌즈에서는 먼저 비점수차나 상면만곡수차를 보정 할 수 있는 렌즈형상을 얻는 것이 중요하기 때문이다(특히 전 광로정이 짧은 렌즈의 경우 더 더욱 강조된다). 고려되지 않은 나머지 수차, 즉 구면수차(특히, 고차의 구면수차)와 왜곡수차는 나중에 비구면을 사용하여 최적화시 보정하기로 한다.

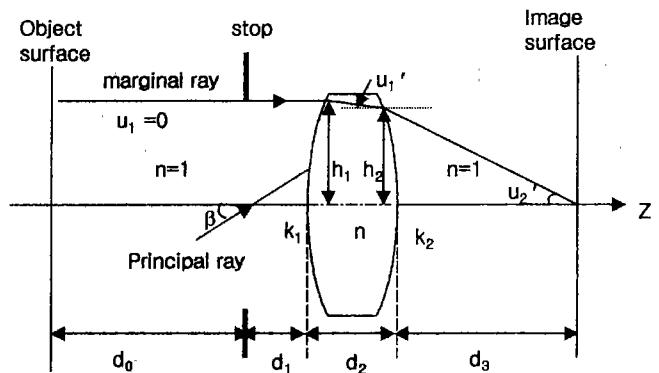


그림 2. 근축 광학적인 광선추적을 위한 광로도.

Seidel 3차 수차이론을 사용하여 초기형상을 결정하기 위해서는 근축 광학적인 광선추적이 필요하다. 다음 그림 2에 극축광선을 추적하기 위해 필요한 각 변수들을 표현하였고, 실제 극축광선 추적을 통해 계산된 Seidel 3차의 구면수차 계수(S<sub>I</sub>), 코마수차 계수(S<sub>II</sub>), 비점수차 계수(S<sub>III</sub>)를식 (22), (23), (24)에 제시하였다. 각각의 수차식들은 첫면의 굴절능에 대한 2차의 비선형 방정식으로 나타난다. 단, 여기에서 유도된 수차식들은 짧은 렌즈 근사(렌즈두께 = 0)를 사용하였고, K는 단일렌즈의 총 굴절능(회절면의 굴절능 제외), k<sub>1</sub>은 첫면의 굴절능, k<sub>2</sub>는 둘째면의 굴절능, h<sub>1</sub>은 주변광선(marginal ray)의 첫면 입사고, β는 반 화각, n은 렌즈의 굴절률, 그리고 d<sub>1</sub>은 입사동(entrance pupil)과 렌즈 첫면 사이의 거리이다.

$$K = k_1 + k_2 \quad (21)$$

$$S_I/h_1^4 = \frac{K}{(n-1)^2} \left[ \left( 1 + \frac{2}{n} \right) k_1^2 - K(2n+1)k_1 + n^2 K^2 \right] \quad (22)$$

$$\begin{aligned} S_{II}/\beta h_1^3 &= \frac{K}{n(n-1)^2} \left[ (n+2)d_1 k_1^2 - (2n^2 d_1 K + nd_1 K + n^2 - 1)k_1 \right. \\ &\quad \left. + n^2(nd_1 K + n - 1)K \right] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} S_{III}/\beta^2 h_1^2 &= \frac{K}{n(n-1)^2} \left[ (n+2)d_1^2 k_1^2 - (2n^2 d_1 K + nd_1 K + 2n^2 - 2)d_1 k_1 \right. \\ &\quad \left. + n^2 d_1 K(nd_1 K + 2n - 2) + n(n-1)^2 \right] \end{aligned} \quad (24)$$

총 굴절능 K는 0.1, f/#는 10, 굴절률 n는 1.5, 그리고 화각 (2β)은 30°로 두고, 조리개가 렌즈 앞 또는 뒤에 있는 경우를 계산하면 다음식 (25)~(30)와 같이 표현된다. 조리개가 앞 또는 뒤에 있는 경우라도 굴절능 및 구면수차의 표현식은 같다. 그리고식 (27), (28)은 입사동과 렌즈 첫면 사이의 거리(d<sub>1</sub>)가 -1.0인 경우이고, 식 (29), (30)은 +1.0인 경우이다.

$$0.1 = k_1 + k_2 \quad (25)$$

$$S_I/h_1^4 = 0.9333k_1^2 - 0.16k_1 + 0.009 \quad (26)$$

$$S_{II}/\beta h_1^3 = -0.9333k_1^2 - 0.1733k_1 + 0.0210 \quad (27)$$

$$S_{III}/\beta^2 h_1^2 = 0.9333k_1^2 + 0.5067k_1 + 0.049 \quad (28)$$

$$S_{II}/\beta h_1^3 = 0.9333k_1^2 - 0.4933k_1 + 0.0390 \quad (29)$$

$$S_{III}/\beta^2 h_1^2 = 0.9333k_1^2 - 0.8267k_1 + 0.169 \quad (30)$$

먼저 조리개가 렌즈 앞에 있는 경우( $d_1 = -1.0$ ) 비점수차( $= 1/2 S_{II} \cos 2\varphi$ , tangential plane상에서  $\varphi = 0$ ) 및 상면만곡( $= 1/4 S_{IV} + 1/4 S_{III}$ )을 보정하기 위해 식 (28)로부터  $S_{III} = 0$ 가 되는 해를 구한다. 식 (28)은  $k_1$ 에 대한 2차 방정식이므로  $k_1$ 에 대해 두 가지 해를 구하면,  $k_1 = -0.1259$ ( $c_1 = -0.2518$ )과  $k_2 = 0.2259$ ( $c_2 = -0.4518$ ) 또는  $k_1 = -0.7784$ ( $c_1 = -1.5568$ )과  $k_2 = 0.8784$ ( $c_2 = -1.7568$ )이다. 그리고 식 (26)를 사용하여 두 경우에 대해 구면수차( $S_p/h_1^4$ )를 계산하면 각각 0.0439, 0.6990이므로 구면수차가 상대적으로 작은  $k_1 = -0.1259$ ( $c_1 = -0.2518$ )와  $k_2 = 0.2259$ ( $c_2 = -0.4518$ )를 최적화의 초기 입력치로 선택하도록 한다. 조리개가 렌즈 뒤에 있는 경우( $d_1 = +1.0$ ), 식 (30)로부터 가능한 두 가지의 해는  $k_1 = 0.5657$ ( $c_1 = 1.1314$ )과  $k_2 = -0.4657$ ( $c_2 = 0.9314$ ) 또는  $k_1 = 0.3201$ ( $c_1 = 0.6402$ )과  $k_2 = -0.2201$ ( $c_2 = 0.4402$ )이다. 같은 방법으로 구면수차를 계산해 비교해 보면, 각각 0.2172, 0.0534이므로  $k_1 = 0.3201$ ( $c_1 = 0.6402$ )과  $k_2 = -0.2201$ ( $c_2 = 0.4402$ )를 최적화의 초기 입력치로 선택한다. 이와 같이  $d_1 = \pm 1.0$ 인 각 경우에 선택된 해에 대해 코마수차를 제거하기 위해 조리개 이동 방정식(stop shift equation)을 사용하고자 한다. 조리개 이동과 관련된 3차의 구면수차 및 코마수차 관련식은 다음과 같이 표현 할 수 있다(그림 3참조).

$$S_{II}^* = S_{II} + QS_I \quad (31)$$

$$Q = \frac{y_p^* - y_p}{y} \quad (32)$$

여기서,  $S_{II}^*$ 는 조리개 이동후의 코마수차 계수,  $S_{II}$ 는 조리개 이동전의 코마수차 계수,  $S_I$ 는 조리개 이동전의 구면수차 계수,  $y$ 는 주변광선의 입사고,  $y_p$ 는 주광선의 입사고,  $y_p^*$ 은 조리개 이동후의 주광선의 입사고로  $Q$ 는 불변량이 된다. 식 (31)과 식 (32)로부터 코마수차가 제거되는 조리개의 위치에 관한 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_1^* = \frac{y_p + \Delta y_p}{\beta} = \frac{y_p + Qy}{\beta} \quad (33)$$

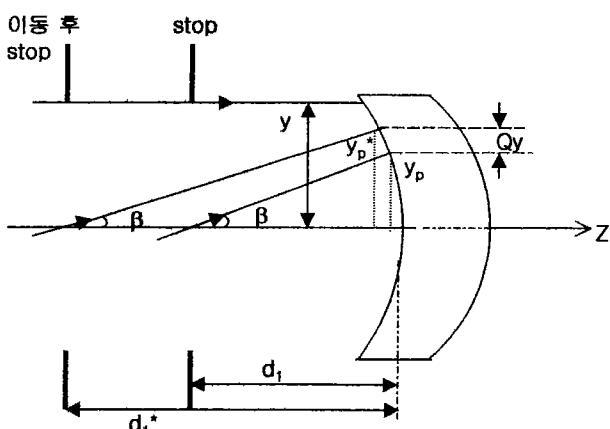


그림 3. Seidel 3차의 코마수차를 제거하기 위해 이동된 조리개 및 그와 관련되는 근축 광학적인 양들.

$d_1 = -1.0$ 일 때, 이동한 조리개의 위치  $d_1^*$ 은  $\beta = -15 \cdot \pi/180$  rad,  $Q = -S_{II}/S_I = 0.3343$ , 그리고  $y = f'/\{2 \cdot (f/\#)\} = 0.5$ 를 식 (33)에 대입하여 구한다. 계산결과  $d_1^*$ 은 -1.638이다. 그리고  $d_1 = +1.0$ 인 경우  $d_1^*$ 은 1.436이다.

### 3.2. 회절소자의 고분산특성을 이용한 색수차 보정

회절소자의 마이너스 고분산특성을 사용하여 회절면과 굴절면이 혼합된 단일렌즈로써 몰색화를 하고자 한다. 이때 몰색화의 조건은 식 (34)로 표현된다.<sup>[3,6,14]</sup>

$$\frac{K_{ref}}{v_{ref}} + \frac{K_{dif}}{v_{dif}} = 0 \quad (34)$$

굴절면의 총 굴절능(앞의 II절에서 K로 표시, 여기서는  $K_{ref}$ )은 0.1, 분산을 55로 두고 가시광 영역에서 식 (34)을 계산하면 회절면의 굴절능을 구할 수 있다.  $K_{dif} = 0.0063$ 으로 계산되고, 식 (16)으로부터 최적화를 위한 회절렌즈의 회절치수(m)가 1일 때, 회절파면의 초기 위상방정식  $C_1$ 은 -0.00315로 결정된다.

## IV. 단매 DOE 렌즈에 대한 최적설계 및 평가

최적화의 초기 입력치로써 앞 절에서 구한 DOE 렌즈의 두 가지 경우에 대해서 최적설계를 진행하고자 한다. 즉, 최적설계의 대상이 되는 렌즈 타입으로는 조리개가 렌즈 앞쪽에 위치하고 조리개를 기준으로 오목, 볼록 형상을 가지는 렌즈와 조리개가 렌즈 뒤쪽에 위치하고 볼록, 오목 형상을 가지는 렌즈의 두 가지 경우이다. 최적 설계의 대상이 되는 렌즈 타입은 두 가지 경우로 국한되지만, 면배치 상에서는 다양한 조합이 발생하게 된다. 예를 들면, 1면이 굴절면이고 2면이 혼합면(굴절면+회절면)인 경우에 있어서 굴절면이 구면 또는 공축비구면이 될 수도 있다. 이와 같이 한 가지 예에서만 가능한 경우의 수가 4가지나 된다. 그러므로 본 논문에서는 현실적으로 가장 관심 있는 경우에 한해서만 최적설계를 실시하고자 한다. 제조과정상 DOE 렌즈의 경우는 양산성 확보를 위해 몰딩 방식을 택하게 될 것이므로 구면과 비구면의 제조 코스트 상의 차이는 없다. 또 회절면의 회절효율이 설계파장 이외의 파장대역에서 저하되는 단점과 몰딩방식에 의한 대량 생산 시 생길 수 있는 회절면의 형상구조 파괴(상면에서의 플레이어 또는 색변집의 주요인)를 고려하면, 본 논문에서 관심의 대상이 되는 경우의 수는 각 타입 별로 두 가지 면배치를 한 총 4가지이다. 그러므로 각각의 타입에 대한 면배치는 1면이 비구면, 2면은 비구면+DOE, 혹은 1면이 비구면+DOE, 2면은 비구면인 경우로 한정된다. 그리고, 추가적으로 회절면을 채용한 경우와 채용하지 않은 경우의 광학성능을 비교하기 위해 각 타입에 대해 굴절면이 비구면으로만 구성된 경우에 대해서도 최적설계를 실시한다.

본 논문에서는 상기의 6가지 경우에 대한 최적설계 시 다음을 고려하여 계산을 진행하고자 한다. 고속의 성능을 얻기 위해  $f/\#$ 를 2.2로 정하고, 소형 경량화를 위해 전장길이를 3.3 mm로 제한한다. 또 DOE 렌즈의 사출성형성을 확보하기 위해 가급적 렌즈 두께는 1 mm 이상으로 한다. 그리고 1/7 인

치 CMOS의 촬상면 면적  $2.0\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ 내에서 상면을 5등분(Field1(F1), F2, F3, F4, F5)하여 수차를 보정하고 파장대역은 가시광 영역을 5등분(656.3, 587.6 546.1 486.1 435.8 nm)해서 계산한다. 이때 최종 단계의 평가는 사람의 눈이 되므로 사람 눈의 감도가 최대(실제 555 nm)인 546.1 nm에 대해 가중치(weighting factor)를 타 파장대비 3배로 두고 계산한다. 최적설계의 목표는 IMT2000 단밀기용의 초소형 카메라이므로 물체거리 기준은 25 cm로 두고 계산한다. 최적설계과정에서 설계변수로써 곡률 2개, 렌즈 두께 및 조리개 위치 각 1개, 굴절면의 원추곡면계수 및 비구면 계수 4개( $\kappa$ , A, B, C), 그리고 회절면의 위상계수 4개( $C_1, C_2, C_3, C_4$ )를 사용한다. 이 중 금형(코아)가공상의 용이성을 확보하기 위해 곡률반경의 경우 1 mm 이상이 되도록 제한조건을 두고 계산한다. 설계시 사용매질은 사출성형의 용이성 및 온·습도 특성, 복굴절 특성이 상대적으로 우수한 일본 ZEON사의 ZEONEX(폴리올레핀계열, 546.1 nm에서 굴절률은 1.52692이고 Abbe 수는 56.2)를 사용한다.<sup>[19]</sup> ZEONEX 이외에도 광학용 플라스틱 렌즈용 재질은 많이 있으나 아크릴계열의 PMMA, OPTORETZ는 흡습성 및 시간에 따른 광학성능의 변화 등 여러 가지 문제점을 안고 있고, PC는 일반 플라스틱 렌즈 대비 굴절률이 높고 환경특성을 뛰어나지만, 복굴절이 큰 것이 단점이다.

최적설계과정을 통해 계산된 6가지의 경우에 대해 광학성능 및 기타 특성치에 관한 비교표를 표 2에 제시한다.

표 2에서 살펴보면, 회절면을 사용하지 않은 경우(1형과 2형), 조리개가 렌즈 뒤쪽에 있는 타입이 공간주파수(36 vs. 31 cycles/mm) 및 전 상고에 걸친 공간주파수의 차이(15 vs. 23 cycles/mm)에 있어 조금 우수한 것으로 판단된다. 그러나 조리개가 렌즈 뒤쪽에 있는 타입(1형)에서는 full field(F5)에서

vignetting<sup>o)</sup> 14%로 상대적으로 큰 값을 가지므로 주변광량비는 오히려 2형이 우수한 것으로 판명된다. 그리고 왜곡수차는 각각의 경우 2.9%(1형), -3.0%(2형)를 가지는데 절대치는 비슷하지만, 부호는 반대이다. 1형의 왜곡수차를 barrel 타입, 2형은 pincushion 타입의 왜곡수차라고 한다. 또, 각각의 타입에 대해 특징적인 결과로써 전장길이는 3.3 mm로 같지만 초점거리는 각각 3.44 mm, 2.09 mm로 꽤 큰 차이를 보인다. 그 이유는 1형의 주요면이 렌즈 첫면 기준 0.81 mm에 위치(제1주요면 P1)하고, 렌즈 둘째면 기준 -1.19 mm 위치(제2주요면 P2)에 있는 것에 반해 2형의 주요면 P1, P2는 -0.71, 0.08 mm 위치해 있기 때문이다. 이것은 근축광학적인 양으로 앞으로 논의가 전개될 3형에서 6형까지도 포함한다. 그리고, 결국 2형이 1형에 비해 초점거리가 짧기 때문에(2.09 vs. 3.44 mm) 음의 굴절능을 가지는 오목면의 굴절능이 1형에 비해 현저히 감소할 수밖에 없고(meniscus 렌즈의 특징 중 하나), 즉, 표 2에서 제시된 것처럼 1형의 각 면의 굴절능은 각각 0.53, -0.36이고 2형은 -0.06, 0.52이므로, 상면에서의 수차보정 효과는 2형이 상대적으로 떨어질 수밖에 없다. 따라서 최종성능은 경우 1이 우수함을 확인 할 수 있다. 결과적으로 조리개가 렌즈 뒤쪽에 있는 타입이 종합적인 성능상에서는 우수하고 이는 회절면을 채용한 경우에 있어서도 그대로 적용된다(3형과 4형의 공간주파수: 67 vs. 34 cycles/mm, 5형과 6형의 공간주파수: 66 vs. 36 cycles/mm).

위에서 분석한 결과를 토대로 4형과 6형은 성능적으로 나쁠 것으로 예상되고, 최종 성능 판단 역시 분석결과와 일치함을 확인할 수 있다(오목면의 굴절능이 작기 때문에 수차보정효과가 거의 없는 것으로 판단된다).

그러면 회절면을 사용한 경우, 종합성능에서 우수한 렌즈를

표 2. 최적설계된 6가지 경우에 대한 광학성능 및 기타 특성치 비교

(단위 : mm)

| Drawing   | 경우 1                         | 경우 2                         | 경우 3                             | 경우 4   | 경우 5                         | 경우 6                              |
|---|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|
|   | 비구면/비구면                      | 비구면/비구면                      | 혼합면/비구면                          | 비구면/혼합면  | 비구면/혼합면                      | 혼합면/비구면                           |
| f/#   | 2.2                          | 2.2                          | 2.2                              | 2.2  | 2.2                          | 2.2                               |
| EFL   | 3.44                         | 2.09                         | 3.49                             | 2.01   | 3.43                         | 1.99                              |
| 전장길이  | 3.3                          | 3.3                          | 3.3                              | 3.3  | 3.3                          | 3.3                               |
| 조리개 직경  | 1.00                         | 0.96                         | 0.98                             | 0.92   | 0.96                         | 0.90                              |
| Vignetting (%)  | 14                           | 0                            | 17                               | 0  | 18                           | 0                                 |
| 회절링의 수(개)   | -                            | -                            | 27                               | 24   | 23                           | 24                                |
| 유효면 직경(1면/2면)   | 1.80/1.06                    | 1.02/1.46                    | 1.86/1.08                        | 1.04/1.52  | 1.86/1.10                    | 1.06/1.54                         |
| Spatial Freq. (MT F = 0.3)<br>(S.F)max-(S.F)min<br>(MT F = 0.3 및 F1~F5) | 36 cycles/mm<br>15 cycles/mm | 31 cycles/mm<br>23 cycles/mm | 67 cycles/mm<br>24 cycles/mm     | 34 cycles/mm<br>30 cycles/mm   | 66 cycles/mm<br>16 cycles/mm | 36 cycles/mm<br>20 cycles/mm      |
| 주변광량비(%)  | 51.0                         | 76.9                         | 49.3                             | 75.4   | 48.2                         | 74.3                              |
| 초점심도(MT F = 0.3)  | -0.031~0.038                 | -0.034~0.052                 | -0.030~0.026                     | -0.049~0.054   | -0.026~0.031                 | -0.023~0.020                      |
| 왜곡수차(%)   | (25 cycles/mm)               | (20 cycles/mm)               | (40 cycles/mm)                   | (20 cycles/mm)   | (40 cycles/mm)               | (30 cycles/mm)                    |
|   | 2.9                          | -3.0                         | 2.9                              | -3.5   | 3.0                          | -3.6                              |
| 굴절면의 굴절능( $K_{ref}$ )   | 0.52692                      | -0.06053                     | 0.50619 (= 0.933K <sub>1</sub> ) | -0.07546   | 0.52691                      | -0.17228 (= 4.844K <sub>1</sub> ) |
| 1면 회절면의 굴절능( $K_{dif}$ )  | -                            | -                            | 0.03635 (= 0.067K <sub>1</sub> ) | -  | -                            | 0.13671 (= -3.844K <sub>1</sub> ) |
| 총 굴절능( $K_1$ )  | 0.52692                      | -0.06053                     | 0.54254                          | -0.07546   | 0.52691                      | -0.03557                          |
| 굴절면의 굴절능( $K_{ref}$ )   | -0.36049                     | 0.51799                      | -0.39717                         | 0.49130 (= 0.898K <sub>2</sub> ) - 0.47811 (= -1.331K <sub>2</sub> ) | 0.52692                      | 0.52692                           |
| 2면 회절면의 굴절능( $K_{dif}$ )  | -                            | -                            | -                                | 0.05561 (= 0.102K <sub>2</sub> ) 0.11886 (= 0.331K <sub>2</sub> )    | -                            | -                                 |
| 총 굴절능( $K_2$ )  | -0.36049                     | 0.51799                      | -0.39717                         | 0.54691  | -0.35926                     | 0.52692                           |
| 렌즈의 총굴절능( $K$ )   | 0.29083                      | 0.47799                      | 0.28648                          | 0.49848  | 0.29162                      | 0.50363                           |

선택하는데 있어서 3형과 5형만 고려하면 된다. 3형과 5형은 동일한 형상을 하고 있기 때문에 MTF(67 vs. 66 cycles/mm), 초점심도(두 경우 공히  $\pm 25 \mu\text{m}$  이상), 주변광량비(49.3 vs. 48.2%)에서는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 회절 링수의 경우, 3형이 5형보다 유효면 내에서 4개나 많지만, 실제 회절면이 채용된 면을 살펴보면, 3형은 렌즈 첫면, 5형은 렌즈 둘째면으로 유효면 직경은 각각 1.86 mm, 1.10 mm로 령 간의 간격은 3형이 상대적으로 크다. 그래서 금형(코아)가공 및 사출성형상의 용이성은 3형이 우수하다고 생각된다(띠의 깊이는 두 경우 모두 1.036  $\mu\text{m}$ ).

그리고 3형과 5형에 있어서 특징적으로 차이가 나는 항목은 회절면과 굴절면의 굴절능 차이인데, 3형은 볼록면(1면)에 회절면을 채용한 경우로써 굴절면의 굴절능 대비 회절면의 굴절능이 7.2%이고 5형은 오목면에 회절면을 채용한 경우인데 그 비가 24.9%이다. 이로 말미암아 회절링의 수가 5형에 있어서 더 조밀함을 확인 할 수 있고(왜냐하면 회절면의 굴절능이 회절파면의 곡률을 결정하기 때문), 표 2에서는 제시되어 있지 않지만 파장에 따른 구면수차 및 배율색수차에 있어서도 3형과 비교해서 다른 경향을 보이고 있음을 그림 4와 그림 5를 통해서 확인 할 수 있다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 각 경우별 파장에 따른 구면수차로써 3형쪽이 5형보다 파장에 의한 구면수차 차이가 작은 값을 가지는데 이는 5형이 회절면의 굴절능이 상대적으로 큰 것에 기인한다(식 (16) 참조). 그리고 그림 5(a)와 그림 5(b)에는 파장에 따른 왜곡수차가 제시되어 있는데 중심파장(546.1 nm)에서 절대 크기는 거의 같은 값(2.9 vs. 3.0%)을 가지지만 파장에 따른 편차는 회절면의 굴절능이 큰 5형이 전 상고에 걸쳐 잘 보정되고 있다(0.3 vs. 1.1%).

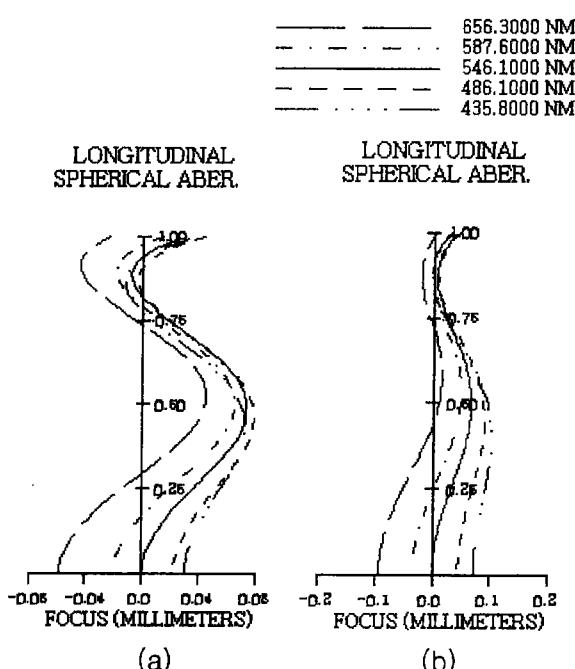


그림 4. 조리개가 렌즈 뒤쪽에 위치해 있는 경우의 파장에 따른 구면수차도 (a) 회절면이 볼록면에 사용된 경우 (b) 회절면이 오목면에 사용된 경우.

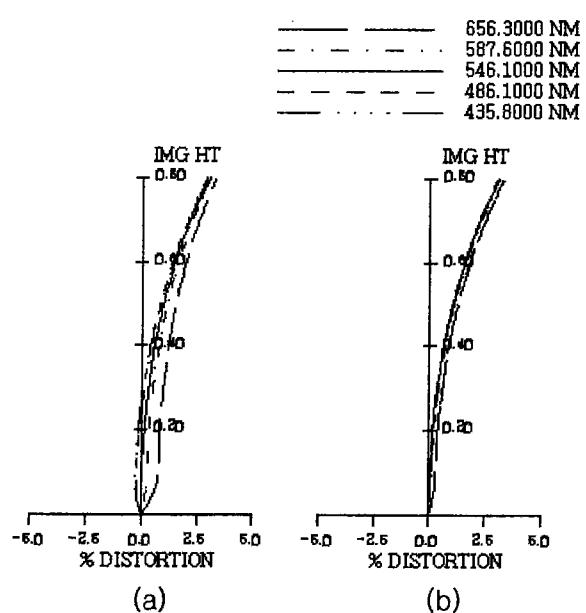


그림 5. 조리개가 렌즈 뒤쪽에 위치해 있는 경우의 파장에 따른 왜곡수차도 (a) 회절면이 볼록면에 사용된 경우 (b) 회절면이 오목면에 사용된 경우.

또, 한가지 흥미로운 성능비교로써 굴절면만 사용한 경우와 회절면을 추가한 경우를 들 수 있다. 굴절면만 사용한 경우에 있어서 최상의 성능은 1형이고 회절면을 추가한 경우에는 3형으로 판단되는데, 두 가지 경우 모두 같은 형상을 가진다. 같은 형상을 가지게 되므로 초점거리, 조리개 직경, vignetting, 유효면 직경, 주변광량비 등 렌즈 형상관련 양들은 거의 비슷하고 MTF 특성에서 크게 차이가 난다. MTF 0.3에서 1형은 공간주파수가 36 cycles/mm이고 3형은 67 cycles/mm 인데 성능적으로 약 1.9배 차이가 난다. 이것의 주원인은 서론에서 설명된 것처럼 회절면의 바구면 효과 및 색수차 보정 효과 때문인 것으로 생각되어진다. 그림 6에서 볼 수 있듯이

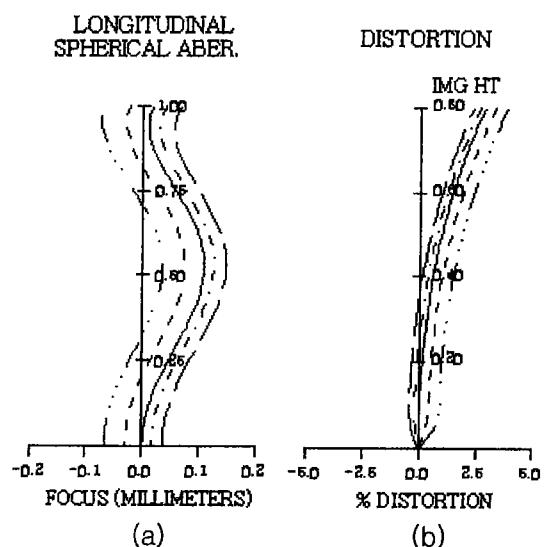


그림 6. 조리개가 렌즈 뒤쪽에 위치하고 굴절면만 사용한 경우의 파장에 따른 수차도 (a) 구면수차 (b) 왜곡수차.

구면수차의 경우는 굴절면만 사용한 쪽(1형)이 파장 대역 전체에 걸쳐 큰 값을 가지고, 왜곡수차의 경우는 중심파장에서는 2.9%로 동일한 값을 가지지만 파장에 따른 편차는 1형이 전 상고에 걸쳐 크게 나타난다. 즉, 본 논문에서 제시한 MTF 값은 polychromatic MTF 값으로 색수차 보정이 잘된 쪽이 회절광학적인 성능이 우수한 것은 너무나 당연한 일이라고 생각한다.

## V. 고차수차 보정용 렌즈(Field flattener)의 추가로 인한 광학성능 향상

앞의 IV절에서 살펴보면 회절면을 채용한 경우에 있어서도, 조리개가 렌즈 앞쪽에 있는 형상은 오목면의 굴절능이 매우 작아 수차 보정에 큰 역할을 하지 못하고, 따라서 종합적인 성능면에서 조리개가 렌즈 뒤쪽에 있는 경우에 비해 현저히 나쁘게 나타났다(2형, 4형, 6형의 각각의 공간주파수는 31, 34, 36 cycles/mm). 따라서 회절면의 비구면 효과(또는, 고차수차 보정 효과)는 굴절면에 의해 그리 크지 않은 것으로 판단되고, 수차 특성이 나쁜 상황에서 색수차 보정 또한 큰 의미는 없다고 판단된다.

본 절에서는 조리개가 렌즈 앞쪽에 있는 형상(2형, 4형, 6형)의 광학성능을 향상시키기 위해 기존의 굴절능을 유지하면서 한 매의 렌즈를 더 추가하고자 한다. 왜냐하면 렌즈가 추가되더라도 기존의 굴절능이 변하지 않으면 기존 렌즈의 부족했던 수차 보정기능을 보완 할 수 있기 때문이다. 그리고 추가되는 렌즈는 Siedel 3차의 상면만곡을 최소화하기 위한 형상을 갖도록 하기 위해 petzval sum이 영이 되도록 한다. 일반적으로 이와 같은 기능을 하는 렌즈를 field flattener라고 부르기도 한다.

Petzval sum( $P = \sum K_i/n_i$ )이 영이 되는 조건으로부터 기존 렌즈의 굴절능( $K_1 = 0.498$ , 경우 4)은 추가 렌즈의 굴절능( $K_2$ )과 동량의 반대 부호가 되고(즉,  $K_1 = -K_2$ ), 위치(d)는 전체 굴절능이 변하지 않는 곳에 두면 되는데  $K_{tot} = K_1 + K_2 - dK_1 K_2$ 로부터 d는  $1/K_1$ 임을 쉽게 알 수 있다. 그러면 최적화를 위한 초기 입력치로써 기존의 렌즈는 4형을 사용하고, 추가 렌즈는 기존 렌즈의 제2주요면으로부터 2.0 mm 떨어진 곳에 첫면의 굴절능이 -0.498이 되도록 구성한 후 계산을 진행한다. 대량 생산성의 확보를 위해 추가 렌즈 역시 사출성형이 용이한 ZEONEX를 사용한다.

IV절에서 언급한 최적설계 시의 제한 조건(f/#, 전장길이, CMOS 크기, 콕률 등) 내지는 고려사항(파장 및 상면의 5등분, 가중치 등) 대로 계산한 후의 결과치를 보면 오목면과 평면으로 구성된 추가 렌즈에 의해서 광학성능 전반에 월등히 향상되었음을 확인 할 수 있다. 렌즈 형상도는 그림 7, 기하광학적인 수차도는 그림 8, 그리고 회절광학적인 평가로서 MTF는 그림 9을 참조하기 바란다. 렌즈 추가 전 · 후의 공간주파수는 34 vs. 85 cycles/mm<sup>2</sup>이고, 왜곡수차는 -3.5%에서 -2.3%로 감소하였고, 특히 파장에 따른 왜곡수차의 편차는 1.0%에서 0.3%로 감소하였다. 한편, 최적화 후에 굴절능은 각각 0.54(L<sub>1</sub>), -0.32(L<sub>2</sub>)이고, 총 굴절능은 0.47로써 초

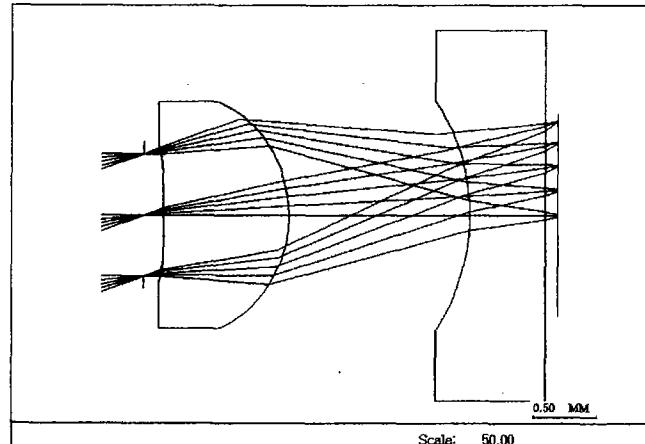


그림 7. 최적설계된 2매 렌즈의 구성도.

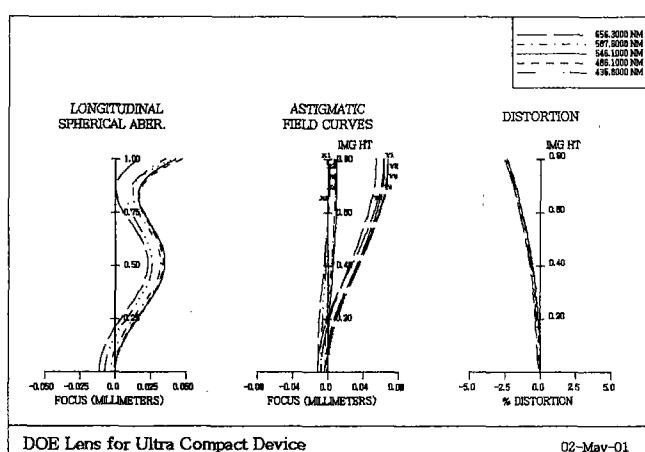


그림 8. 최적설계된 2매 렌즈의 기하광학적인 수차도.

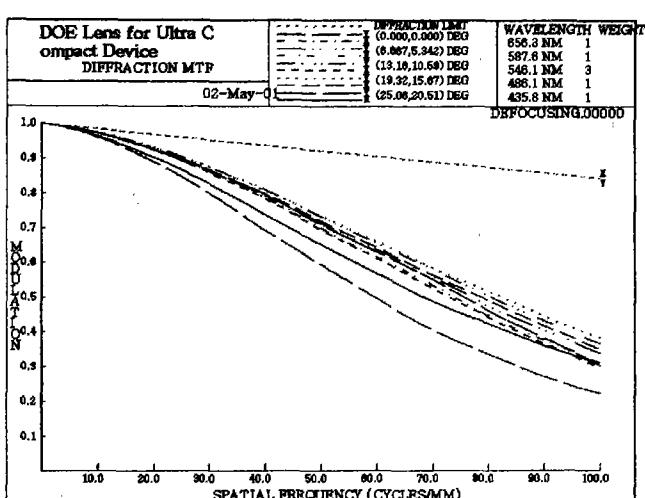


그림 9. 최적설계된 2매 렌즈의 MTF 곡선.

기의 0.49와 그리 큰 차이를 보이지 않았다. 참고적으로 본 절에서 설계된 렌즈계의 데이터를 표 3에 제시하니 참조하기 바란다.

표 3. 고차수차 보정용 렌즈가 추가된 2매 렌즈의 최적설계치

| f/2.2 | 중심파장 : 546.1 nm |                |        |
|-------|-----------------|----------------|--------|
| No.   | Radius (mm)     | Thickness (mm) | Glass  |
| OBJ   | Infinity        | 250            |        |
| STO   | Infinity        | 0.157707       |        |
| 2     | -48.55143       | 1.00000        | ZEONEX |
| 3     | -1.02057        | 1.442293       |        |
| 4     | -1.65970        | 0.60000        | ZEONEX |
| 5     | Infinity        | 0.09999        |        |
| IMG   | Infinity        | -              |        |

2면 :  $\kappa = 0.0$ (구면) A = -0.349865 B = 0.660743 C = -0.284063E+013면 :  $C_1 = -0.016794$   $C_2 = 0.011905$   $C_3 = -0.042275$   $C_4 = 0.027809$  $\kappa = 0.16989$ (타원면) A = 0.064565 B = -0.0066243 C = 0.075184

## VI. 결 론

본 논문에서는 정보통신 단말기기용 영상 전송 모듈에 사용되어질 수 있는 초소형 카메라용 렌즈를 설계하였다. 기존 광학성능은 유지하면서 정보통신 단말기기의 소형화 추세에 발맞춰 광학 시스템 역시 소형화가 시대적인 요구사항이 되고 있다. 실내의 어두운 조명 하에서도 영상의 정보전달이 가능토록 고속의 렌즈가 요구되고, 또 소형의 크기를 만족시키기 위한 회절광학소자의 적용은 필수 불가결한 하나의 기술 흐름으로 자리잡고 있는 실정이다. 그러므로 본 논문에서는 굴절계와 회절광학소자가 일체화된 단매의 렌즈로써 최상의 솔루션을 확보하기 위해 설계변수 및 형상, 조리개 위치 등에 대해 검토하였다. 검토 방법으로써 Seidel 3차의 수차이론을 바탕으로 한 해석적인 접근법이 시도되었다. 먼저 경박단소화에 유리한 단매의 렌즈에 대해 검토하였고, 이때 (유효)설계 자유변수를 적절히 활용하여 코마 및 비점수차가 제거된 해를 얻었고 동시에 상면만곡과 구면수차도 어느 정도 보정할 수 있었다. 회절소자의 마이너스 고분산특성을 이용하여 회절파면의 초기 위상방정식도 구할 수 있었다. 형상, 조리개 위치, 굴절면과 회절면의 가능한 면배치 등 발생할 수 있는 다양한 설계 가능성에 대해 검토한 결과, 양산성, 회절효율 및 회절면의 형상파괴 등을 고려하여 총 6가지로 압축시킬 수 있었다. 총 6 가지 가능성에 대해 최적설계를 실시하였고, 그리고 결과치에 대해 광학성능 및 기타 특성치들을 비교/분석/평가한 결과, 초소형 영상 전송용 렌즈로써 최적이라고 생각되는 솔루션을 제안할 수 있었다. 형상적으로는 볼록, 오목면, 면배치 상으로는 하이브리드면, 공축비구면, 그리고 조리개의 위치는 오목면 바로 뒤쪽에 위치한 타입의 렌즈이고 고속(f/2.2) 및 광화각(30° 이상)에서 색수차 및 고차수차가 보정된 렌즈 포함 상면거리 3.3 mm의 초소형 카메라 렌즈다(MTF 0.3에서 67 cycles/mm). 한편, 성능향상의 한 방법으로써 기존 단매 렌즈의 굴절능을 전체 (2매) 렌즈의 굴절능으로 하면서 petzval sum이 영이 되도록 렌즈를 추가하였고, 이로 말미암아 최적설계 후 기존 광학성능을 크게 향상시킬 수 있었다. 즉 기존 성능 대비 MTF의 경우 31 vs. 85 cycles/mm로 대폭 향상되었다. 최적설계로 얻은 상기의 2매 구성 렌즈는 줌 렌즈로도 가능성을 가지고 있고, 현재 연구 중에 있다.

## 감사의 글

본 논문은 2000년도 한남대학교 교비학술연구비로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] M. D. Missing and G. M. Morris, "Diffractive optics applied to eyepiece design," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 14, pp. 2452-2461, 1995.
- [2] G. J. Swanson and W. B. Veldkamp, "Diffractive optical elements for use in infrared systems," *Opt. Eng.*, vol. 28, p. 605, 1989.
- [3] T. Stone and N. George, "Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats," *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 14, pp. 2960-2971, 1988.
- [4] T. Shiono, M. Kitagawa, K. Setsune, and T. Mitsuyu, "Reflection micro-Fresnel lsens and their use in an integrated focus sensor," *Appl. Opt.*, vol. 28, p. 3434, 1989.
- [5] T. Shiono and H. Ogawa, "Diffraction-limited blazed reflection diffraction microlenses for oblique incidence fabricated by electron-beam lithography," *Appl. Opt.*, vol. 33, p. 3643, 1991.
- [6] D. W. Sweeney and G. E. Sommargen, "Harmonic diffractive lens," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 14, pp. 2469-2475, 1995.
- [7] D. A. Buralli, G. M. Morris, and J. R. Rogers, "Optical performance of holographic kinoforms," *Appl. Opt.*, vol. 28, p. 976, 1989.
- [8] M. B. Fleming, and M. C. Hutley, "Blazed diffractive optics," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 20, pp. 4635-4643, 1997.
- [9] 鹿島伸悟, 回折光學素子入門 (オプトロニクス社, 東京, 1997), pp. 117-130.
- [10] W. C. Sweatt, "Describing holographic optical elements as lenses," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 67, no. 6, pp. 803-808, 1977.
- [11] W. C. Sweatt, "New method of design holographic optical element," *Proc. SPIE*, vol. 126, pp. 46-53, 1977.
- [12] W. C. Sweatt, "Describing and constructing thick holographic optical elements," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 8, pp. 1220-1227, 1978.
- [13] W. C. Sweatt, "Achromatic triplet using holographic optical elements," *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 5, pp. 1390-1391, 1977.
- [14] W. C. Sweatt, "Mathematical equivalence between a holographic optical element and an ultra-high index lens," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 69, pp. 486-487, 1979.
- [15] Young Ghi, Hong Sun Il, Wan Gu Yeo, and Chul Koo Lee, "Telephotolens design with refractive/diffractive hybrid lens," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 1, no. 2, pp. 74-80, 1997.
- [16] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering* (McGraw-Hill, Inc., 1990)
- [17] 이상수, 기하광학 (교학연구사, 서울, 1985), 4장.
- [18] Y. Ogata and Akiruno, "Lens system including a diffractive optical element," U.S. Patent 5949577, 1999.
- [19] 임천석, "플라스틱 fθ 렌즈의 복굴절이 결상빔경에 미치는 영향분석," *한국광학회지*, 제11권 2호, pp. 73-79, 2000.

## Hybrid (refractive/diffractive) lens design for the ultra-compact camera module

Hwan Seon Lee, Cheon Seog Rim<sup>†</sup>, Jae Heung Jo, and Soo chang

*Applied Optics and Electromagnetics Shcool of Nature Science, Hannam University, Taejon 306-791, KOREA*

<sup>†</sup>E-mail: csrim@eve.hannam.ac.kr

Hyun Kyu Kim

*Agency for Defense Development, Taejon 305-600, KOREA*

(Received March 9, 2001 ; Revised manuscript received May 11, 2001)

A high speed ultra-compact lens with a diffractive optical element (DOE) is designed, which can be applied to mobile communication devices such as IMT2000, PDA, notebook computer, etc. The designed hybrid lens has sufficiently high performance of less than f/2.2, compact size of 3.3 mm (1st surf. to image), and wide field angle of more than 30 deg. compared with the specifications of a single lens. By proper choice of the aspheric and DOE surface which has very large negative dispersion, we can correct chromatic and high order aberrations through the optimization technique. From Seidel third order aberration theory and Sweatt modeling, the initial data and surface configurations, that is, the combination condition of the DOE and the aspherical surface are obtained. However, due to the consideration of diffraction efficiency of a DOE, we can choose only four cases as the optimization input, and present the best solution after evaluating and comparing those four cases. On the other hand, we also report dramatic improvement in optical performance by inserting another refractive lens (so-called, field flattener), that keeps the refractive power of an original DOE lens and makes the petzval sum zero in the original DOE lens system.

*Classification codes :* IP.010, DI.010.