

회절광학소자를 이용한 콤팩트 디지털 스틸 카메라용 광학계 설계

박성찬 · 정준호

단국대학교 기초과학부 물리전공

(2000년 5월 16일 받음, 2000년 7월 31일 수정본 받음)

본 논문에서는 회절광학소자를 이용하여 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계를 설계 및 평가하였다. 기존의 디지털 스틸 카메라용 광학계가 retrofocus 형태인 것에 비해 콤팩트한 광학계를 얻기 위해서 telephoto 형태로 구성하였다. 또한, 본 광학계를 회절광학소자와 굴절광학소자가 결합된 hybrid 플라스틱 렌즈 1매와 순수한 굴절광학소자 1매로 구성하여 무게, 부피 등을 줄이고자 하였다. Gauss 괄호를 이용한 근축 광선추적을 통해 초기 설계치를 수치 해석적인 방법으로 구하였다. 제1면을 비구면화하고, 색수차를 보정하기 위해 제2면을 회절광학소자를 이용하여 설계된 광학계는 1/4" CCD, F/4에 대응되도록 최적화하였다. 최종적으로 설계된 광학계의 초점거리는 3.89 mm, 전장(overall length)은 5.19 mm로서 콤팩트하며, 현재의 디지털 스틸 카메라용 광학계에서 요구하는 성능을 충분히 만족하며, 차세대 화상통신용 광학계에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

OCIS codes : 050.1970, 080.2740.

I. 서 론

1980년대 MIT 대학의 Garry Swanson과 Rochester 대학의 Michael Morris에 의해 활성화된 회절광학소자(Diffractive Optics Elements : DOE)에 관련한 연구는 오늘날 산업기술의 발전과 더불어, 미세 가공기술 및 금형에 의한 대량복제 기술이 가능함에 따라 회절광학소자에 관련된 기초기술과 응용부분이 크게 발전하였다. 특히, 광학 제품 및 부품의 새로운 개념을 실현하기 위해서 새로운 기술인 회절광학소자를 이용한 광학계 설계, 제조 및 평가에 대한 연구가 시도되고 있다.

얇은 플라스틱 기판 또는 필름 위에 원하는 패턴을 새겨서 제작하는 회절광학소자는 기존의 굴절 광학계에 비해 고성능, 양산성 및 집적화가 용이하기 때문에, 소형 또는 박형이 요구되는 휴대용 영상 기기, Digital Still Camera, Head Up Display, DVD(Digital Video Disk)에 관련된 Optical Data Storage용 Pick Up 장치, Optical Low Pass Filter 등에 응용되는 것을 비롯하여 많은 장점을 가지고 있다. 반면에, 단점으로서 파장 의존성이 크다는 것과 넓은 파장 영역에서 높은 회절효율을 얻는 것이 어렵다는 점이 있다.

본 연구에서는 회절광학소자의 광학특성 및 색수차 보정에 대한 방법을 다루었으며, 콤팩트 디지털 스틸 카메라용 광학계의 초기설계 데이터를 수치 해석적인 방법으로 구하였다. 그리고, 초기설계 데이터를 바탕으로 1/4" CCD, 41만 화소 및 F/4에 적합한 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계를 렌즈 설계 프로그램인 CODE-V를 이용하여 최적 설계하였다.

회절광학소자를 이용하여 설계된 콤팩트 디지털 스틸 카메라용 광학계는 부피, 무게, 수차 특성 등을 줄이기 위해 hybrid 플라스틱 렌즈 1매와 순수한 굴절광학소자 1매로 이루어진 telephoto 형태로 구성되었다. 최종적으로 설계된 디지털 스틸 카메라용 광학계는 전장이 5.19 mm로 기존의 디지털 스틸 카메라용 광학계보다 매우 콤팩트하다.

II. 회절광학소자의 개요

2.1. Zone Boundary

굴절을, surface relief의 높이 및 주기, 광경로의 변화를 통해서 파면의 위상 또는 진폭을 조절하는 회절광학소자는 대부분 동심원 zone 구조로 유리나 플라스틱에 홀로그램 간섭무늬를 기록하거나, 몰딩, 플라스틱 사출, 다이아몬드 터닝 등의 방법을 이용하여 제작한다.^[1]

그림 1은 동심원 zone 구조를 갖는 회절광학소자의 surface relief이다. Zone은 다음과 같이 계산되는 광경로차(Optical Path Difference: OPD)가 파장의 정수배일 때마다 존재한다.

$$OPD = m\lambda k, \quad k=1, 2, 3, \dots \text{ 정수.} \quad (1)$$

여기서, m 은 회절차수이고, λ 는 파장이다.

회절광학소자의 특성은 광축에 대해 회전대칭성인 특징을 갖는 위상 함수로 표현된다. 즉, 광학계의 위상함수 $\Phi(r)$ 는 각각의 zone의 위상함수 Φ_n 를 합한 것으로 다음과 같이 표현된다.

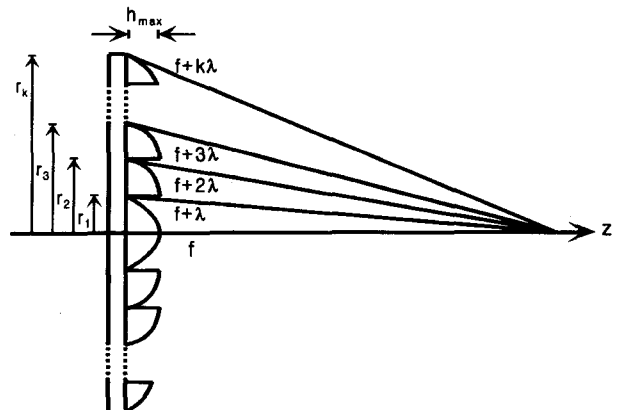


그림 1. 회절광학소자에 대한 기하학적인 표기.

$$\Phi_n(r) = \frac{2\pi}{\lambda} a_n r^{2n},$$

$$\Phi(r) = \sum_{n=1} \Phi_n(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 + \dots). \quad (2)$$

여기서, $r^2 = x^2 + y^2$ 이다.

회절광학소자가 포함된 결상계에서 각각의 zone을 통과한 모든 빛을 동일한 위상으로 상면에 도달되도록 하기 위해서는 각 zone에 의한 위상지연(phase delay)이 2π 의 정수배가 되도록 만들어야 한다. 또한, zone 사이의 광로차가 파장의 정수배일 때 각각의 zone은 가간섭적이다. 이런 회절광학소자의 k -번째 zone의 반경 r_k 는 다음과 같이 표현된다.^[2]

$$r_k = \sqrt{2kf\lambda + k^2\lambda^2}. \quad (3)$$

여기서, f 는 초점거리, k 는 정수이다.

그리고, blaze의 최대높이 h_{max} 는

$$h_{max} = \frac{\lambda}{n-1} \quad (4)$$

이다.

여기서, 회절차수는 $m=1$ 인 경우이고, n 은 굴절률, λ 는 파장이다.

회절광학소자의 설계는 크게 zone 반경을 적절히 설정하여 수차를 최소화하는 것과 설계 차수로(designed order) 모든 빛이 회절되게 blaze를 적절히 설계하여 회절효율이 최대가 되도록 하는 것으로 나눌 수 있다. 또한, 회절광학소자로만 구성된 것은 색수차가 매우 크게 발생하므로 굴절소자와 회절광학소자가 결합된 hybrid 렌즈를 적절히 사용하는 것이 필요하다.

2.2. Hybrid 광학계의 물색화

일반적인 굴절광학소자는 굴절률이 파장의 함수로 존재하기 때문에 색수차가 발생한다. 이러한 굴절광학소자는 (+) 굴절능을 갖는 렌즈와 (-) 굴절능을 갖는 렌즈를 조합함으로써 색수차를 보정할 수 있는데, 이것은 서로 다른 굴절능을 갖는 두 개의 렌즈가 전체 파장에 대해서 초점거리의 변화를 감소시키고 두 개의 파장에 대해서는 동일한 초점거리를 갖기 때문이다.

회절광학소자 역시 파장 의존성이 매우 크고, 짧은 파장에 비해 긴 파장의 회절각이 크다. 따라서, 대역폭이 넓은 파장 범위에 이용할 때 반드시 색수차를 고려해야 한다.

회절광학소자의 색수차 보정은 회절광학소자와 굴절광학소자가 결합된 hybrid 렌즈로 가능하며, 굴절부분의 (+) 분산과 회절부분의 (-) 분산이 결합되어 단 한 장(singlet)으로 물색화가 가능하다.^[3-5] 그림 2는 일반적인 굴절광학소자, 회절광학소자, 그리고 hybrid 광학계의 파장에 따른 초점거리의 변화를 보여주고 있으며, 그림 3은 일반적인 굴절광학소자로 구성된 doublet과 한 장의 렌즈로 구성된 hybrid 광학계의 물색화 조건을 보여준다.

그림 3에서처럼 굴절광학계에서의 물색화는 일반적으로 Abbe number가 크고, (+) 굴절능을 갖는 crown계 렌즈와 Abbe number가 작고, (-) 굴절능을 갖는 flint계 렌즈를 결합하여 사

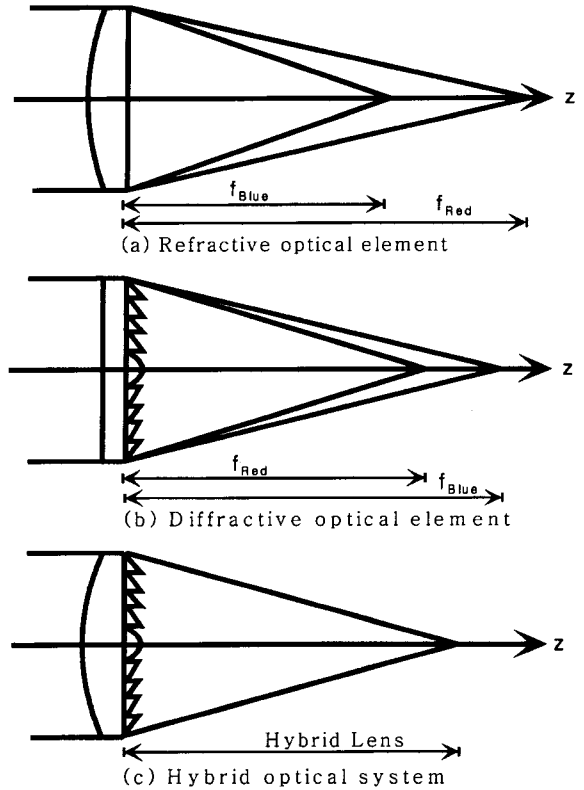


그림 2. 굴절광학소자, 회절광학소자 및 hybrid 광학계의 파장에 따른 초점거리 변화.

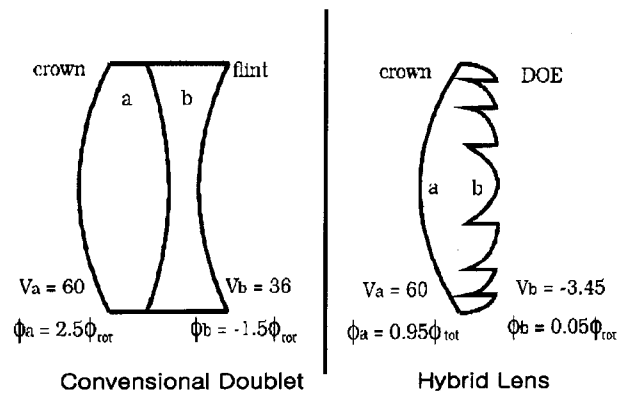


그림 3. 물색화된 doublet 설계의 예.

용하므로, 최소 두 장의 렌즈가 필요하다. 그리고, 각각의 굴절능 부호가 반대이고 전체 광학계의 굴절능(ϕ_{tot})이 일정한 값을 갖기 위해서는 접합부분의 곡률이 매우 커야하므로, 수차 보정 및 제조상의 어려움이 따른다. 그러나, 굴절소자와 회절소자로 구성된 hybrid 렌즈는 단 한 장의 렌즈로 물색화가 가능하며, 각 소자의 굴절능이 모두 같은 부호를 갖고 있으므로, 각각의 면에 대한 곡률을 작게 만들 수 있다는 것이 큰 장점이다.

회절광학소자의 분산 특성을 나타내는 Abbe number V_{dif} 는 다음과 같다.^[6]

$$V_{dif} = \frac{\lambda_c}{\lambda_s - \lambda_l} = -\frac{\lambda_c}{\Delta\lambda} \quad (5)$$

단, λ_c 는 설계중심파장, λ_s 는 짧은 파장, λ_l 는 긴 파장이다. 따라서, 가시광선 영역에 대해서 V_{dif} 를 구하면 다음과 같다.

$$V_{dif} = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} = \frac{587.6 \text{ nm}}{486.1 \text{ nm} - 656.3 \text{ nm}} = -3.45. \quad (6)$$

이것은 일반적인 굴절광학소자의 Abbe number가 20에서 90 사이인 양의 값에 비해 매우 작고, 음의 값을 갖기 때문에, 이러한 특성을 이용하여 hybrid 렌즈의 일차 색수차를 보정할 수 있다.^[7]

Hybrid 렌즈의 물색화 조건을 만족시키기 위한 굴절부분과 회절부분의 굴절능은 각각 다음과 같다.^[8]

$$\phi_{ref} = \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{dif}} \phi_{tor} \quad (7)$$

$$\phi_{dif} = \frac{V_{dif}}{V_{dif} - V_{ref}} \phi_{tor} \quad (8)$$

단, $V_{ref} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$, $V_{dif} = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C}$ 이다. (9)

위의 식에서 ϕ_{tor} 는 전체 굴절능이고, ϕ_{ref} 와 ϕ_{dif} 는 각각 굴절과 회절부분의 굴절능이다.

III. Flat field, aplanat 조건을 만족시키는 광학계의 초기설계

그림 4는 무한 물체점을 갖는 디지털 스틸 카메라용 광학계에 대한 초기 설계 개략도이다. 전형적인 telephoto 형식으로서 (+) 굴절능을 갖는 렌즈와 (-) 굴절능을 갖는 렌즈 2매로 구성되어 있기 때문에 광학계의 전장을 짧게 하는데 매우 유리하다. 또한, 사람의 눈에 시감도가 가장 높은 녹색, 즉, 546.1 nm(e-line)를 기준파장으로 설정하였다. 첫 번째 렌즈는 플라스틱 재질인 PMMA($n_1=1.4936$)이고, 두 번째 렌즈는 BK7($n_3=1.5187$)으로 구성되어 있다. 그리고, $n_0=n_2=n_4$ 는 공기의 굴절률에 해당되며 그 값은 1이다.

3.1. Flat field, aplanat 조건을 만족시키는 디지털 스틸 카메라용 광학계의 수치해석

본 논문에서는 초기설계시 제 1면을 원추곡면화하여 구면수

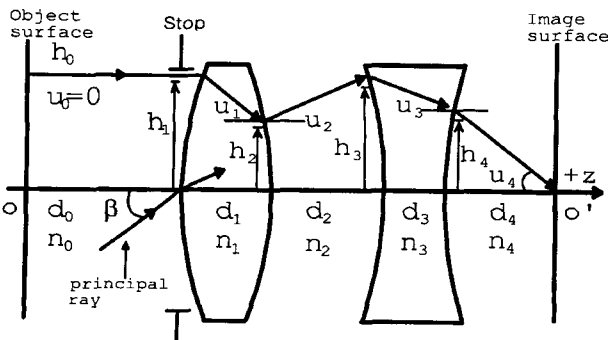


그림 4. 무한 물체점을 갖는 광학계에 대한 초기설계 개략도.

차를 보정하려고 한다. 조리개면과 일치하는 면에 원추곡면을 채용하면 구면수차에만 영향을 주고 다른 수차에는 영향을 주지 않는다. 따라서, 그림 4와 같이 조리개를 제 1면에 설정하여 제 1면의 원추계수 p_1 만을 조절하여 3차 구면수차를 보정하고자 한다.

그림에서 주광선이 조리개의 중심에서 광축과 이루는 각을 b 라 하면, 초점거리(f), 구면수차(S_I), 코마(S_{II}), Petzval Sum(S_{IV})의 계수를 Gaussian Brackets를 이용하여 정리하면 다음과 같다.^[9]

$$\frac{1}{f} = \phi = \left[\phi_1, -\frac{d_1}{n_1}, \phi_2, -\frac{d_2}{n_2}, \phi_3, -\frac{d_3}{n_3}, \phi_4 \right], \quad (10)$$

$$S_I = h_0^4 \{ X + a_4^2 g_6 (\phi_4 g_6 + \alpha) + p_1 c_1^3 (n_1 - 1) \}, \quad (11)$$

$$S_{II} = h_0^3 \beta \{ Y + a_4 b_4 g_6 (\phi_4 g_6 + \alpha) \}, \quad (12)$$

$$S_{IV} = H^2 \left\{ W + \frac{\phi_4}{n_4 n_3} \right\}. \quad (13)$$

단, $a_4 = \left[\phi_1, -\frac{d_1}{n_1}, \phi_2, -\frac{d_2}{n_2}, \phi_3, -\frac{d_3}{n_3}, -c_4 n_3 \right]$,

$$b_4 = \left[-\frac{d_1}{n_1}, \phi_2, -\frac{d_2}{n_2}, \phi_3, -\frac{d_3}{n_3}, -n_3 c_4 \right],$$

$$g_6 = \left[\phi_1, -\frac{d_1}{n_1}, \phi_2, -\frac{d_2}{n_2}, \phi_3, -\frac{d_3}{n_3} \right].$$

위 식에서 $c_i (i=1, 2, \dots, 4)$ 는 각 면의 곡률, $n_i (i=0, 1, \dots, 4)$ 은 굴절률, $\phi_i (i=1, 2, \dots, 4)$ 는 각 면의 굴절능으로서 $\phi_i = c_i (n_i - n_{i-1})$ 로 표현되고, $d_i (i=1, 2, \dots, 4)$ 는 면사이의 거리, 그리고 p_1 는 제 1면의 원추곡면 계수를 나타낸다. 위 식에서 보듯이 조리개가 위치한 제 1면을 원추곡면화하여도 구면수차만 변화될 뿐, 여러 비축수차에는 영향을 주지 않는다. $u_i (i=0, 1, \dots, 4)$ 는 축상광선의 근축각이고, H 는 Lagrangian 불변량, []은 Gaussian Brackets를 나타낸다.

식 (11), (12), (13)에서, 변수 X, Y, W 및 α 는 c_3 이하의 변수, 즉, c_1, d_1, c_2, d_2, c_3 로 구성되어 있다. Flat field aplanat 조건을 만족시키는 광학계를 얻기 위해서는 식 (11), (12), (13)으로 주어지는 수차계수가 모두 0이 되어야 한다.

우선, 식 (11)로부터 구면수차 계수가 0이 되기 위해서는 원추계수 p_1 는 다음과 같은 식이 만족되어야 한다.

$$p_1 = \frac{X + a_4^2 g_6 (\phi_4 g_6 + \alpha)}{c_1^3 (1 - n_1)}. \quad (14)$$

그리고, 식 (13)으로부터 Petzval 상면만곡이 0이 될 조건은 다음과 같으며, 설계 변수 c_3 이하의 변수로 구성되어 있다.

$$c_4 = \frac{n_3 W}{n_3 - 1}. \quad (15)$$

단, $W = \frac{\phi_1 + \phi_2}{n_1} + \frac{c_3 (n_3 - 1)}{n_3}$.

앞에서 구한 초점거리에 대한 식 (10)에 식 (15)에서 주어진

c_4 를 대입하여 c_3 에 대한 2차 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$c_3^2 q_1 + c_3 q_2 + q_3 = 0. \quad (16)$$

또한, 식 (12)로부터 코마수차가 0이 되기 위한 d_3 에 관한 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$d_3^2 s_1 + d_3 s_2 + d_3 s_3 + d_3 s_4 + s_5 = 0. \quad (17)$$

식 (17)에서 d_3 에 대한 각 차수의 계수(s_1, s_2, \dots, s_5)는 c_4 이하의 변수로 구성되어 있다. 따라서, 식 (14), (15), (16)과 식 (17)을 만족하는 광학계는 주어진 초점거리에 대해 flat field, aplanat 조건을 만족시킨다. 그러므로, flat field, aplanat 조건을 만족시키는 디지털 스틸 카메라용 광학계의 초기설계는 임의의 값 c_1, d_1, c_2, d_2 에 대해 식 (14), (15), (16), (17)을 만족하도록 c_3, d_3, c_4, p_1 을 결정하면 된다.

우선 식 (16)으로부터 임의의 값 c_1, d_1, c_2, d_2 에 대해 설계변수 c_3 를 구하고, 이 해를 이용하여 식 (15)로부터 설계변수 c_4 를 구할 수 있다. 또한, 식 (16)을 만족하는 c_3 로부터 식 (17)을 이용해 d_3 값을 결정한다. 이러한 방식으로 구한 모든 초기설계 변수를 식(14)에 대입하여 원추계수 p_1 값을 구하였으며, 식 (16)에 포함된 초점거리(f)는 일정한 값을 갖도록 설정하였다.

그러나, flat field, aplanat 조건을 만족시키는 디지털 스틸 카메라용 광학계의 초기설계시 아무런 제한조건 없이 모든 설계변수에 대한 해를 조사하는 것은 매우 어려운 일이므로 적당한 범위를 설정하여 조사하는 것이 필요하다. 그리고, 식 (14), (15), (16), (17)을 통해 설계변수에 대한 해를 얻었더라도 이것은 수학적 해에 불과하므로 물리적으로 타당성이 없는 해는 버려야 한다.

본 논문에서는 flat field, aplanat 조건을 만족시키는 디지털 스틸 카메라용 광학계의 해를 다음과 같은 초기설계 조건을 이용하여 구하였다. 첫째, 임의의 설계변수인 곡률반경(1/곡률)은 $\pm 3 \text{ mm}$ 부터 $\pm 50 \text{ mm}$ 까지 1 mm 간격으로 해를 조사하였다. 둘째, 제1면과 제2면 사이의 거리는 0.5 mm에서 3 mm까지 0.1 mm 간격으로, 그리고 렌즈 사이의 간격은 0.5 mm에서 5 mm까지 0.1 mm 간격으로 조사하였다. 셋째, 본 광학계가 telephoto 형태, 즉 첫 번째 렌즈가 (+) 굴절능을 갖고 두 번째 렌즈가 (-) 굴절능을 갖도록 곡률반경에 대한 해를 구하였다.

이런 과정을 통해 얻은 flat field, aplanat 조건을 만족시키는 디지털 스틸 카메라용 광학계에 적절한 초기설계 데이터가

표 1. Flat field, aplanat 조건을 만족시키는 디지털 스틸 카메라용 광학계에 대한 초기설계 데이터

No.	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass
OBJ	INFINITY	INFINITY	
Sto	3.00000	2.40000	PMMA
		원추계수 : $p_1 = -2.69612$	
2	-3.00000	2.00000	Air
3	-3.15920	0.60000	BK7
4	3.04244	-	

표 2. Flat field, aplanat 조건을 만족시키는 디지털 스틸 카메라용 광학계의 초기설계 데이터에 대한 Seidel 3차 수차량

No.	구면수차	코마	비점수차(Tas/Sas)	Petzval curv.	왜곡수차	
Sto	-0.00212	-0.00938	-0.020713	-0.011494	-0.11015	-0.01695
	0.01274	0.00000	0.000000	0.000000		0.00000
2	-0.01135	0.00631	-0.008053	-0.007274	-0.11015	0.00135
3	0.00084	0.00088	0.007062	0.006859	0.10811	0.00238
4	-0.00011	0.00222	-0.007495	0.002179	0.11226	-0.01424
Sum	0.00000	0.00003	-0.029200	-0.009730	0.00007	-0.02746

표 1에 정리되어 있다. 표 2는 초기설계된 광학계의 Seidel 3차 수차량이다. 표 2에서 보듯이 구면수차, 코마, 그리고 Petzval 상면만곡의 수차값이 0에 가까우므로 본 광학계가 flat field, aplanat 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

IV. 회절광학소자를 이용한 광학계의 최적설계

4.1. 설계 목표 사양

앞 절에서 flat field, aplanat 조건을 만족시키는 디지털 스틸 카메라용 광학계에 대한 초기설계 데이터를 수치 해석을 통해 얻었다. 이 광학계는 Seidel 3차 수차 내에서 구면수차, 코마 그리고 Petzval 상면만곡이 0이다. 하지만, 이 초기설계 데이터는 단지 수치 해석적인 것에 불과하므로, 이것이 곧 바로 실제 디지털 스틸 카메라용 광학계의 모든 사양을 만족시키는 것은 아니다. 광학계를 설계 및 개발에 앞서 목표 사양을 정하는 것이 먼저 수행되어야 하며 그 다음으로 사양을 만족시키는 광학계를 얻기 위해 최적설계 과정을 하는 것이 일반적인 진행과정이다.

디지털 스틸 카메라용 광학계의 대부분은 고정초점 방식이고, 초점거리는 5~6 mm, F/#는 2~4 정도이고, 화각은 50~60°, 화소수는 35만 또는 41만 화소가 주류를 이루고 있으며, 촬상소자는 1/3 인치 CCD, 또는 1/4 인치 CCD가 일반적이다.^[10] 이러한 광학계는 대부분 (-) 굴절능을 갖는 렌즈와 (+) 굴절능을 갖는 렌즈로 구성된 retrofocus 형태로서 후초점거리가 초점거리에 비해 길기 때문에 광각을 요구하는 광학계에 적합하다.^[11] 그러나, 좀더 컴팩트한 광학계를 요구하는 사양에서는 (+) 굴절능과 (-) 굴절능으로 구성된 telephoto 형태가 보다 유리한데, 그 이유는 초점거리가 후초점거리(Back Focal Length : BFL) 보다 길다는 특징을 갖고 있기 때문이다. 따라서, 본 논문에서 설계하고자 하는 컴팩트 디지털 스틸 카메라용 광학계의 구성은 (+) 굴절능을 갖는 렌즈 1매와 (-) 굴절능을 갖는 렌즈 1매로 구성된 telephoto 형태의 광학계이다.

또한, 본 광학계의 전반부는 회절광학소자와 굴절광학소자가 결합된 hybrid 렌즈로 구성되며, 플라스틱 재질인 PMMA를 사용하고, 후반부는 순수한 굴절소자로서 구면 렌즈를 사용하고자 한다. 회절광학소자의 재질로 광학유리 대신에 PMMA를 사용하는 이유는 PMMA가 광학유리보다 가볍고, 금형에 의한 복제가 쉬워 대량생산이 가능하며 비구면등을 제작하는데 용이하기 때문이다. 또한, PMMA의 가장 큰 장점은 회절

형상을 새기기가 쉽다는 것이다. 물론, PMMA가 광학유리에 비해 열에 민감하다는 단점이 있지만, 일반적인 환경에서는 카메라의 자동초점조절 기능(auto focus)을 이용해 온도 변화에 따른 초점이동을 어느 정도 보완할 수 있다.

본 논문에서는 콤팩트한 디지털 스틸 카메라용 광학계를 설계하는 것이 목적이므로, 광학계를 telephoto 형태로 구성하였으며, F/4이고, 주변광량은 1.0 field에서 40% 이상, 그리고 공간 주파수 80 lp/mm에서 MTF 값이 30% 이상이 되도록 목표치를 정하였다. 그리고, 왜곡수치는 사람의 눈이 상의 왜곡을 구별할 수 없을 정도인 ±2% 이내로 설정했고, 촬상소자로서는 1/4인치 CCD를 사용하므로 최대 상고는 ±2.3 mm 가 되도록 설정했다. 또한, 광학계의 전장은 가능한 한 짧도록 하였다.

4.2. 최적화 설계

초기설계된 광학계는 구면수차, 코마, Petzval 상면만곡만이 보정되고 나머지 Seidel 3차 수차인 비점수차와 왜곡수차, 그리고 고차수차 및 색수차는 보정되어 있지 않다. 초기설계 과정에서 고려하지 않은 Seidel 3차 수차 및 색수차를 보정하기 위하여 최적화 설계과정에서는 제1면을 일반적인 비구면으로 비구면화하고, 제2면은 회절광학소자를 적용하여 색수차를 보정하였다.

본 광학계의 제1면에 적용된 일반적인 비구면 방정식은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+p)c^2h^2}} + Ah^4Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + \dots \quad (18)$$

여기서, c는 곡률, h는 비구면에서의 광선의 입사고, p는 conic 상수이며, A, B, C 및 D는 비구면 계수이다. 모든 최적화 과정에 사용된 회절광학소자의 위상(phase)에 관한 식은 다음과 같다.^[7]

$$\Phi(r) = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right) \sum_{n=1}^{10} C_n r^{2n} \quad (19)$$

단, $r^2 = x^2 + y^2$.

식 (19)의 위상 항의 계수중 C_1 은 회절광학소자의 굴절능에 관계되므로 계수 C_1 에 의해 결정되는 굴절능이 전체 굴절능에 비해 작은 값을 갖도록 설계하는 것이 필요하며, 나머지 위상 항의 계수인 C_2, C_3, C_4 는 파면의 모양을 결정하므로 적절히 조절하여 파면수차를 보정한다.

식 (19)의 첫 번째 항 C_1 과 회절차수가 1차인 경우 회절광학소자만의 굴절능 ϕ_{diff} 와는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\phi_{diff} = -2C_1 \quad (20)$$

마지막으로, 최적화 설계과정에서 고차수차의 보정 외에도 설계 목표 사양에 적합하도록 광학계의 곡률반경, 각 면간 거리, 비구면 계수 및 회절광학소자의 위상계수에 대해 구속조건(constraints)을 설정하여 최적화하였다. 그리고, 첫 번째 소자의 재질인 플라스틱 계열의 PMMA는 설계시 비구면의 형

표 3. 회절광학소자를 이용한 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계의 최적화 설계값

F-number : 4.0		중심 파장 : 546.1 nm (e-line)	
No.	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass
OBJ	Infinity	Infinity	
	-10.47051	1.40000	PMMA
STO	비구면 : $p = 261.733347, A = -0.050690,$ $B = 0.011786, C = -0.135023, D = 0.694416$		
2	-1.56222	3.09541	
	DOE(구면) : $C_1 = -0.005021, C_2 = -0.001337,$ $C_3 = -0.005938, C_4 = 0.000518$		
3	-2.00000	0.50000	BK7
4	Infinity	0.20001	
IMG	Infinity	-	

상이 매끄럽게 되도록 해야하고, 중심과 주변의 두께 차이가 크지 않도록 해야하며, 허용 공차를 크게 할 수 있도록 함으로써 제조오차에 대한 성능의 안정성을 확보하도록 하였다.

4.3. 설계결과 및 평가

표 1에서 주어진 초기설계 데이터로부터 설계 목표 사양에 맞도록 최적화한 결과가 표 3이다. 표 3에서 제 4면의 곡률반경이 무한대인데, 이는 최적화 과정 중 제 4면의 곡률반경을 아주 크도록 구속조건을 설정하여 최적화를 행했기 때문이다. 제 4면의 곡률반경을 아주 크도록 구속한 이유는 IR Cut 코팅을 쉽게 하기 위해서다.

최적 설계된 광학계의 각 면에 대한 굴절능을 살펴볼 필요가 있다. 우선 회절광학소자의 회절부분을 제외한 굴절부분에 대한 굴절능은 쉽게 구할 수 있다. 또한, 회절광학소자의 굴절능은 회절광학소자의 위상 항에 대한 계수중 C_1 에 의해 결정되므로 식 (20)로 계산할 수 있다. 이런 과정을 통해서 각 면의 굴절능을 계산하여 표 4에 정리해 놓았다. 표 4에서 볼 수 있듯이 회절광학소자의 굴절능은 굴절광학소자의 굴절능에 비해 매우 작고, 전체 광학계는 telephoto 형태라는 것을 알 수 있다. 표 5은 최적설계된 콤팩트 디지털 스틸 카메라용 광학계의 설계사양이다.

그림 5는 최종적으로 설계된 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계의 구성도이다. 일반적으로 포토리소그래피 방법으로 회절소자를 제작할 때는 평판 위에다 미세 패턴을 새기는 방법이 널리 사용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 표 3과 그림 5에서 보듯이 회절소자가 불룩한 구면 위에 놓여 있는데,

표 4. 회절광학소자를 이용한 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계의 각 면에 대한 굴절능

Surface No.	ϕ_{tot}	ϕ_{ref}	ϕ_{diff}	ϕ (element)
1 (Stop)	-0.0471	-0.0471	-	
2 (DOE)	0.3259	0.3159	0.0100	$\phi_1 = 0.2935$
3 (Refr.)	-0.2594	-0.2594	-	
4 (Refr.)	0	0	-	$\phi_2 = -0.2594$

단, $\phi_{tot} = \phi_{ref} + \phi_{diff}$ 이고, $\phi_{ref} = c(n-1), \phi_{diff} = -2C_1$.

표 5. 최적설계된 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계의 설계 사양

항목	설계 사양
구성	회절소자+굴절소자
EFL	3.89 mm
TT(S ₁ ... _i)	5.19 mm
F/#	4.0
최대 상고	±2.3 mm
CCD 크기(화소수)	1/4"(41만화소)
왜곡수차	0.33%
주변광량비(%) (0.8/1.0 F)	66/51
	Field (y) 80 lp/mm (S/T)
	0.0 73/73
MTF (%)	0.6 72/66
	0.8 71/59
	1.0 68/45

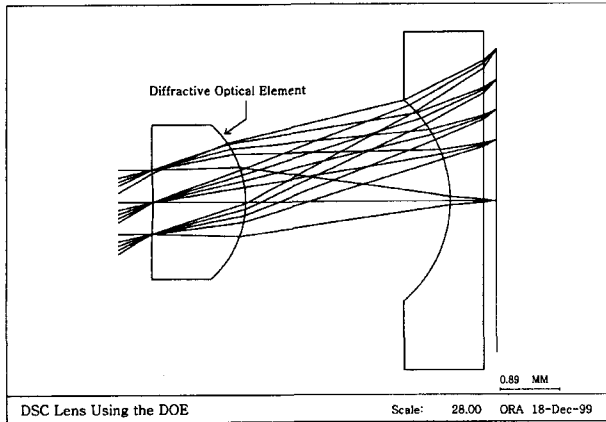


그림 5. 최적설계된 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계의 구성도.

이런 형태의 회절소자는 금형 제작으로 대량복제가 실제로 가능하다. 본 광학계의 전장은 5.19 mm로 매우 콤팩트하며, 주변광량비는 1.0 field에서 50% 이상을 만족시킨다. 그림 6은 광학계의 수차도 이고, 그림 7은 광학계의 MTF 특성을 나타내는 것으로서 공간 주파수 100 lp/mm에서 MTF는 모든 field에 대해 30% 이상의 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 마치

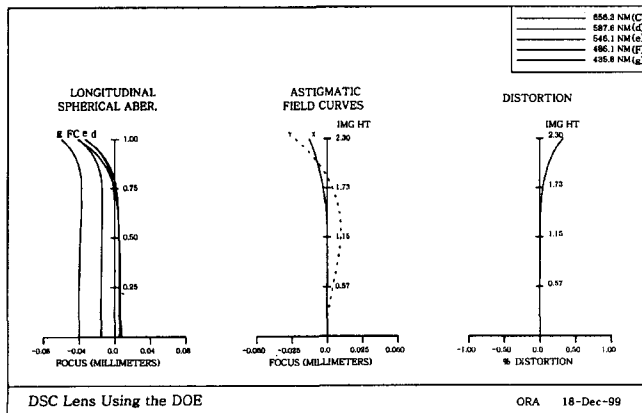


그림 6. 최적설계된 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계의 수차 특성.

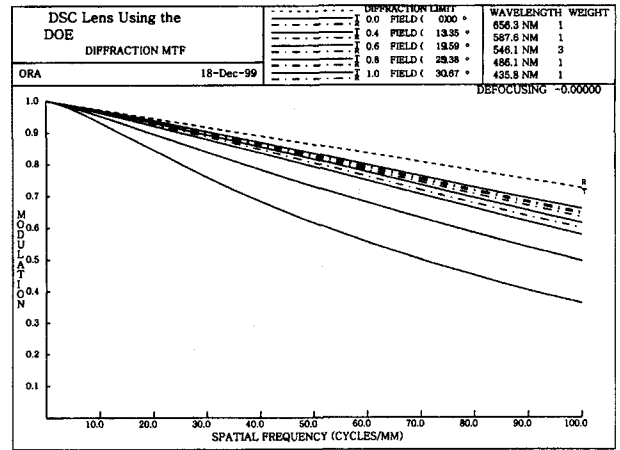


그림 7. 최적설계된 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계의 MTF 특성.

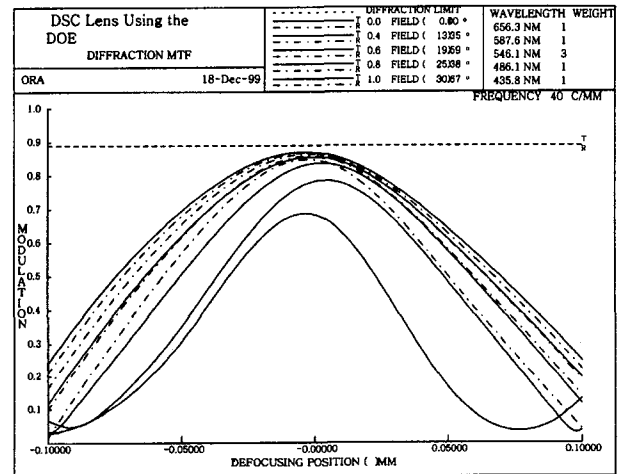


그림 8. 최적설계된 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계의 defocus에 대한 MTF 특성 (40 lp/mm 기준).

막으로 그림 8은 공간주파수 40 lp/mm에서의 defocus에 따른 MTF 특성을 보여주고 있다. defocus를 함에 따라 MTF 특성이 감소되는 것이 일반적이지만, 이 때의 MTF 곡선은 최적 상점(best focus)을 기준으로 종 모양의 대칭적이어야 초점 어긋남이 발생해도 안정된 특성을 갖을 뿐만 아니라 자동초점조절(AF)이 용이해진다. 따라서, 그림 8의 defocus에 따른 MTF 특성은 이러한 특성을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 설계된 회절광학소자를 이용한 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계는 기존의 디지털 스틸 카메라용 광학계 보다 콤팩트하며, 또한 모든 설계 사양을 만족하고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 회절광학소자를 이용하여 기존의 retrofocus 형태보다 콤팩트한 디지털 스틸 카메라용 광학계를 설계하였다. 이러한 광학계를 설계하기 위해서 회절광학소자의 기본적인 원리와 색수차 보정 방법을 정성적으로 고찰하였다. 콤팩트 디지털 스틸 카메라용 광학계의 초기설계 데이터를 얻기

위한 기본적인 개념인 Gauss 괄호를 이용한 근축광선추적에 대해 언급했으며, 이러한 개념을 이용하여 수치 해석적인 방법으로 광학계에 대한 초기설계 데이터를 얻었다. 그리고, 초기설계 데이터를 바탕으로 1/4" CCD, 41만 화소 및 F/4에 적합한 콤팩트형 디지털 스틸 카메라용 광학계를 렌즈설계 프로그램인 CODE-V를 이용하여 최적 설계하였다.

본 논문에서 설계한 디지털 스틸 카메라용 광학계는 부피, 무게, 수차 특성 등을 줄이기 위해 hybrid 플라스틱 렌즈 1매와 순수한 굴절광학소자 1매로 이루어진 telephoto 형태로 구성되었다. 최종적으로 설계된 디지털 스틸 카메라용 광학계의 초점거리는 3.89 mm, 전장이 5.19 mm로서 기존의 디지털 스틸 카메라용 광학계보다 콤팩트함을 알 수 있었다. 또한, 본 광학계의 주변광량비, 수차특성 및 MTF 특성이 디지털 스틸 카메라용 광학계에서 요구하는 성능을 충분히 만족함을 알 수 있었으며, 현재 소형화, 경량화가 요구되는 차세대 화상통신용 광학계에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(981-0206-019-1) 지원

으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] J. A. Futhy, Proc. SPIE **1052**, 142-149 (1989).
- [2] M. Young, J. Opt. Soc. Am **62**, 972-976 (1972).
- [3] T. Stone and N. George, Appl. Opt. **24**, 2960-2972 (1988).
- [4] D. Faklis and G. M. Morris, J. Opt. Soc. Am **3**, 53-57 (1986).
- [5] O. Arnon, A. Reichert, and A. Avnour, Proc. SPIE **554**, 518-525 (1985).
- [6] W. C. Sweatt, Appl. Opt. **16**, 1390-1391 (1977).
- [7] C. Londono, Ph.D. dissertation, 26 (1992).
- [8] P. Mouroulis and J. Macdonald, *Geometrical Optics and Optical Design* (Oxford University Press, New York) 196 (1997).
- [9] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics* (Interscience, New York, 1958) 457-462.
- [10] 이춘곤, 남병덕, "디지털 카메라의 기술현황," 광학과 기술 62-70 (1998).
- [11] 김문준, 회절광학소자를 이용한 디지털 스틸 카메라용 결상광학계 설계, 단국대학교 석사학위 논문 (1999).

Optical system design for compact digital still camera using diffractive optical elements

Sung Chan Park and Jun Ho Jeong

Department of Physics, School of Basic Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

(Received May 16, 2000, Revised manuscript received July 31, 2000)

In this paper, the fundamental properties of diffractive optical element were investigated. Also, this work deals with theoretical approaches for achromatization in DOE's optical system based on thin lens theory. It is found that achromatization could be satisfied by one hybrid lens only, which is composed of a diffractive and a refractive element. In order to have compact optical system, we used the tele-photo type lens composed of a positive and a negative power elements instead of retro-focus lens. From the Gaussian brackets and Seidel aberration theory, the initial design was numerically obtained. The aberration properties of an initial design was aplanat and flat field. In order to correct the chromatic aberrations, refractive and diffractive elements were used on front element. This hybrid lens is also useful for correction of higher order aberrations. Compared to conventional design composed of refractive lenses only, this approach dramatically improved the compactness of the optical system. Finally, residual aberration balancing results in a lens with focal length of 3.89 mm and overall length of 5.19 mm, which has enough performance over an f-number of 4.0. Also, it is expected to fulfill all the requirements of a digital still camera lens. This optical system is superior to the current refractive lens system in the number of elements, weight, and aberration properties.

OCIS codes : 050.1970, 080.2740.