

## 단매와 대칭 2매로 구성된 DOE 렌즈의 광학성능 비교 및 분석

이환선 · 임천석<sup>†</sup> · 조재홍

한남대학교 자연과학부 광·전자물리학 전공

Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133

(2002년 3월 5일 받음, 2002년 4월 1일 수정본 받음)

본 논문에서는 단매와 대칭 2매로 구성된 DOE 렌즈를 1/3인치 이미지 센서(크기 4.8 mm×3.6 mm)에 대해 F/2.8, 전장길이(이미지 면 포함 거리) 6.8 mm로 최적 설계하였고 그 광학성능 및 각종 특성치들을 비교, 분석하였다. 그 결과 단매 DOE 렌즈의 단점으로 여겨지는 유효직경 내의 많은 회절링의 수, 설계치수 외로 파장별 회절되는 광에 의해 화면에 나타나는 플레어 및 색번짐, 큰 왜곡수차 등을 대칭 2매의 렌즈를 사용함에 의해 최소가 되도록 할 수 있었다.

주제어 : DOE, single DOE lens, symmetrical double DOE lens, diffractive optical element, hybrid lens, DOE lens.

### I. 서 론

DOE(Diffractive Optical Element) 렌즈는 종래의 글래스로 구성된 구면렌즈의 경우 3매 또는 4매 이상으로 가능한 성능을 단매로도 달성할 수 있을 뿐만 아니라 소형화도 가능하다는 장점을 가지고 있다. 특히 플라스틱 사출방식으로 제조되기 때문에 비구면화도 용이하고 가격 또한 저가화 할 수 있다. 그리고 글래스 연마방식과는 달리 사출조건만 유지하면 렌즈 자체의 산포는 크지 않다는 것도 큰 장점이라고 생각한다.

현재 1/3인치, 1/4인치, 1/5인치, 1/7인치 등 여러 가지 이미지 센서에 대한 렌즈 제품군이 각 사별로 출시되고 있고 그 유형을 살펴보면 현재 정보통신용 단말기로 사용 또는 제안되어지고 있는 렌즈 종류는 크게 4가지로 나눌 수 있다. 먼저 구면의 글래스 렌즈로만 구성된 경우, 1/4", 1/3" 크기의 VGA급 이미지 센서에 걸쳐 높은 광학성능을 확보하기 위해서는 4매~6매 정도가 필요한데 이로 인해 저가 및 경박단소에는 문제점이 많다. 이를 보완한 것이 글래스 렌즈 1매~3매와 비구면 플라스틱 렌즈 1매로 구성된 방식과 DOE 렌즈 1매와 비구면 플라스틱 렌즈 1매~2매로 구성된 방식인데, 요즘 이와 같은 방식의 제품이 출시되고 있다. 한편 IMT-2000용 단말기에는 현재 10만 화소급의 1/7" 이미지 센서가 사용되어 지고 있는데, 특히 초소형화를 위해 단매의 렌즈로도 색수차 및 고차수차를 보정할 수 있는 회절면과 비구면이 일체화된 단매의 DOE 렌즈가 적용되고 있다. 그러나 1/3인치, 1/4인치 이미지 센서에 단매의 DOE 렌즈를 적용하는 경우 저가화 및 초소형화 조건은 만족시킬 수 있지만 왜곡수차, 회절링의 수, 플레어(flare, contrast 저하) 및 색번짐, 공차특성 등 여러 가지 문제점으로 인해 VGA급의 화상에는 미치지 못하는 단점도 있다. 본 연구에서는 저가화 및 초소형화 조건을 만족하면서 1/7", 1/4", 1/3"에서 VGA급의 화상을 실현할 수

있는 대칭구조를 가지면서 동일렌즈로 구성된 2매의 DOE 렌즈를 제안한다.

비구면과 회절면이 일체화된 DOE 렌즈를 저가로 대량생산할 수 있는 방법은 초정밀 사출인데, 이는 이미 선진국에서 다양한 제품군에 적용하고 있다. 본 연구는 동일렌즈를 사용하여 설계함으로써 초기 투자되는 금형 비용을 최소화 하면서 저가화를 실현하고, 또 높은 광학성능을 얻는 것에 관한 것이다. 즉, 앞에서 설명한 4가지 종류의 렌즈들의 단점을 보완하면서도 광학적으로는 고성능을 얻고, 초소형화의 요구에도 부응할 수 있는 회절렌즈 설계에 관한 것이다.

본 논문에서는 단매와 대칭 2매로 구성된 DOE 렌즈의 광학성능을 비교/분석하기 위하여 1/3인치 이미지 센서(크기 4.8 mm×3.6 mm)에 대해 F/2.8, 전장길이(렌즈 첫 번째 면에서 이미지면까지의 거리) 6.8 mm로 최적 설계를 하였고, 상호간의 광학성능, 회절면에 의한 결상성능저하(플레어 및 색번짐), 사출성형법에 의한 제작 난이도 및 회절면의 형상과괴 정도 등을 비교 분석하였다. 그리고 요즘 화상통신 카메라의 소형화 추세에 따라, 설계된 대칭 2매 렌즈의 전장길이를 6.8 mm에서 4.8 mm로 축소시켰을 때의 광학성능 및 특성치들의 변화도 살펴보았다.

### II. 회절광학소자 이론 및 초기형상 결정<sup>[1]</sup>

일반적으로 회절광학소자의 설계법은 크게 위상함수법과 고굴절률법(Sweatt 모델)으로 나뉜다.<sup>[2,3]</sup> 위상함수법은 회절파면의 위상함수로서 회절면을 표현하는 것으로 요즘의 상용화된 대부분의 프로그램에서 채택하는 방법이다. 그리고 고굴절률법 또는 Sweatt모델<sup>[4]</sup>이라고 부르는 설계법은 회절면을 굴절률이 아주 큰 얇은 박막(두께=0)으로 취급하는데 본 논문에서는 위상함수법과 고굴절률에 관련된 이론들을 간략히 소개하고 좀 더 자세한 내용은 참고문헌 [5]를 참조하기 바란다.

일반적으로 회절파면의 위상방정식은 다음과 같이 주어진다.

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

$$\begin{aligned} \Phi(r) &= m \frac{2\pi}{\lambda_0} (C_1 r^2 + C_2 r^4 + C_3 r^6 + \dots) \\ &= m \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum C_n r^{2n} \end{aligned} \quad (1)$$

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

이때 회절 링의 간격( $r$ )은 광로차가 설계중심파장( $\lambda_0$ )의 정수배( $k$ )만큼 차이가 나도록 결정되는데 다음 식 (2) 또는 (3)으로 주어지고 두 식간의 결과는 동일하다.

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

$$k\lambda_0 = m \sum C_n r^{2n} \quad (3)$$

여기서 (2) 식과 (3) 식은 회절소자의 굴절능에 관한 표현식으로 상호 치환가능하며 그 표현은 식 (4)로 주어진다.

$$K_{dif} = -2C_1 \frac{m\lambda}{\lambda_0} \quad (4)$$

그러면 회절차수  $m=1$ 이고  $\lambda=\lambda_0$ (설계중심파장) 일 때  $C_1$ 은 초점거리와 다음 관계식으로 표현된다.

$$C_1 = -\frac{1}{2f} = -\frac{n-1}{2R} \quad (5)$$

여기서  $R$ 은 회절파면의 곡률 반경을 나타낸다.

한편 회절광학소자의 분산은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$v_{dif} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_d}{\lambda_s - \lambda_l} \quad (6)$$

여기서  $\lambda_d$ 는 설계중심파장이고,  $\lambda_s$ 는 사용파장 중 짧은 쪽 파장이며,  $\lambda_l$ 은 긴 쪽 파장이다. 통상 가시광 영역에서 굴절렌즈의 Abbe 수( $v_{ref}$ )는 20~95이고, 부분분산비( $P_{g,F}$ )는 0.53~0.63의 값을 갖는데 비해 회절렌즈는 식 (6)으로 계산한 Abbe 수( $v_{dif}$ )가 -2.48로 매우 큰 마이너스의 고분산 특성을 갖고 있다. 그러므로 광학면을 굴절면과 회절면의 혼합면으로 구성하면 색수차를 보정 할 수 있게 되는데 근축광학적인 색수차 보정 조건은 다음과 같이 주어진다.

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

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

$$K_{tot} = K_{ref} + K_{dif} \quad (7)$$

표 1. 파장 및 회절차수에 따른 회절효율 계산

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

표 2. Seidel 3차 수차론에 의한 렌즈계의 초기 설계값

F/10, 화각 = 30°, 굴절률 = 1.5, 총 굴절능 = 0.1		
각 면의 곡률	조리개가 렌즈 앞에 위치	조리개가 렌즈 뒤에 위치
$c_1$	-0.2518	0.6402
$c_2$	-0.4518	0.4402

추가적으로 Fresnel 렌즈와 같은 톱니 형태(kinoforn)의 구조를 가지는 위상형 회절소자에 있어서 톱니의 높이( $h_{max}$ ), 띠의 최대수( $N_{max}$ ), 파장 및 회절차수에 따른 회절효율은 식 (8), (9), 표 1에 정리하여 놓았으니 참고하기 바란다.<sup>[6-8]</sup>

$$h_{max} = \frac{m\lambda_0}{N(\lambda_0) - 1} \quad (8)$$

$$N_{max} = m \left( \frac{1}{\lambda_0} \right) \sum C_n r_{max}^{2n} \quad (9)$$

한편 본 논문에서 최적설계의 초기 해로써 사용한 데이터는 Seidel 3차 수차이론으로부터 결정하였는데 다음 표 2에 그들을 정리해 놓았다.<sup>[9,10]</sup> 그 도출과정에 대해서는 참고문헌 [1]을 참조하기 바란다.

### III. 단매 및 대칭 2매로 구성된 DOE 렌즈의 광학성능 평가

본 논문에서는 단매와 동일 2매로 구성된 DOE 렌즈의 광학성능을 비교/분석하기 위하여 1/3인치 이미지 센서(크기 4.8 mm×3.6 mm)에 대해  $f/2.8$ , 전장길이(렌즈 첫 번째 면에서 이미지면까지의 거리) 6.8 mm로 최적 설계를 하였다.<sup>[11,12]</sup>

최적설계의 도구로써는 미국 ORA社의 CODE V(version 9.00)를 사용하였고, 각각의 렌즈 구성에 대하여 최적의 성능을 확보하기 위해 다양한 방법으로 최적화를 진행하였다. 즉, 수평/수직방향에 대한 필드의 가중치 조절, 파장별 가중치 조절, 추적되는 광선의 수와 광선의 가중치, 최대/최소의 중심두께 및 최소의 가장자리 두께 제한 등 가능한 모든 변수들에 대해 최적설계를 하였고 그 성능을 살펴보았다. 설계 시 사용한 파장대역은 436 nm~656 nm로써 656.3 nm, 587.6 nm, 546.1 nm, 486.1 nm, 435.8 nm의 5 파장으로 나누어 설계하였고 이때 중심파장은 546.1 nm로 하였다. 그리고 상면은 광축(0 필드, F1), 0.25 필드(F2), 0.5 필드(F3), 0.7 필드(F4), 1.0 필드(F5)로 5등분해서 설계하였는데 이 정도 구간으로 나누면 각 구간 사이에서 광학성능상에 문제가 발생하지 않기 때문이다.

(단위 : %)

설계 후 제작은 사출성형법에 의한 대량생산을 염두에 두었기 때문에 신뢰성 특성에서 우수하다고 판단되는 ZEONEX를 선택했고 설계사용 파장별 굴절률은 각각 1.52196, 1.5247, 1.52692, 1.53129, 1.53649이다.

3.1. 단매 DOE 렌즈의 성능분석

다음 표 3에 단매 DOE 렌즈의 주요한 광학 성능을 정리·요약하였다.

표 3에서 1형과 2형은 단매 DOE 렌즈의 광학 성능을 나타내는데 1형은 1면이 굴절/회절 혼합면, 2면이 굴절면으로 구성되어 있고 2형은 1면이 굴절면, 2면이 혼합면으로 구성되어 있다. 표 1에서 알 수 있듯이 1형과 2형은 회절면에 대한 특성치들(회절링의 갯수, 회절면의 굴절능)을 제외하고 나머지 광학적 특성치들(곡률, 두께, 초점거리, 입사동 직경 등)은 큰 차이가 없다.

1형과 2형의 초점거리는 각각 7.09 mm, 7.18 mm이고 각 면의 곡률 반경은 1.86/2.10 mm(1형), 1.88/2.39 mm(2형)로 비슷한 값들을 가지고 있어 2형을 기준으로 살펴보면 제1 주요면은 렌즈 1면에서 -1.86 mm, 제2 주요면은 렌즈 2면에서 -2.37 mm인 곳에 위치해 있다. 렌즈 첫 면에서 물체까지 거리는 250 mm로써 유한 물점을 가지는 결상 렌즈이다. 따라서 F# 역시 유한 물점을 기준으로 정의해야 하는데 일반적으로

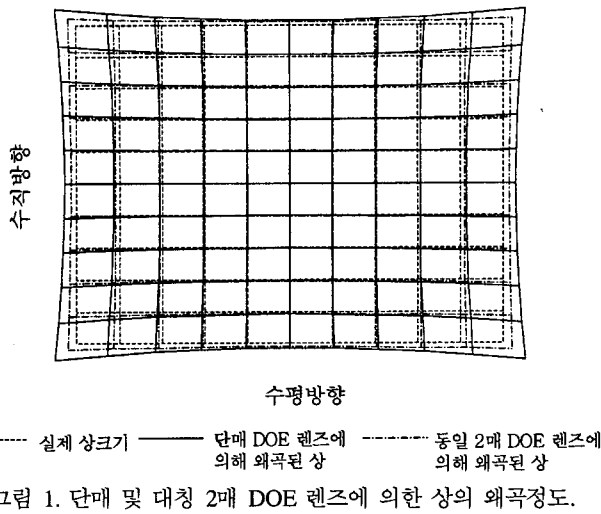
유효 F#의 경우 (제2 주요면에서 상거리)/(입사동 직경)으로 주어지므로  $F\# = 7.551/2.685 = 2.8$ 로 정의된다. 또는  $F\# = 1/(2 * \text{상공간의 수치구경})$ 라는 관계식으로부터  $1/(2 * 0.179) = 2.8$ 로 정의될 수도 있다. 만약 무한 물체를 기준으로  $F\#(\text{유효 초점거리}/\text{입사동 직경})$ 가 정의된다면  $7.180/2.685$ 이므로 약 2.67의 값을 갖게 된다. 한편 여기서 초점거리 대비 물체거리가 약 35배 크므로 실제 제2 주요면에서 상거리(7.551 mm)와 유효 초점거리(7.180 mm)가 거의 비슷함을 알 수 있다. 그리고 표 1에서 제시된 물체화각은 35.4°(수평) 26.9°(수직)로 250 mm 거리에서 약 160 mm(수평) 120 mm(수직) 정도 크기의 물체를 볼 수 있고 이미지 센서의 크기는 4.8 mm(수평) 3.6 mm(수직)이므로 0.03(약 1/33)의 축소배율을 갖는다. 30만 화소(640x480)를 기준으로 한 픽셀의 크기가 7.5 μm x 7.5 μm이므로 최소 분해할 수 있는 물체 크기는 약 0.25 mm(Rayleigh 기준)으로는 약 0.125 μm임을 알 수 있다.

결상 렌즈의 해상력의 척도인 MTF는 전 상고, 전 파장 영역에 걸쳐 0.3을 기준으로 31.5 cycles/mm 이상의 공간주파수 값을 나타내고 있다. 입사각에 따른 주변광량비는 중심에서의 상면휘도(Illuminance, lumens/cm<sup>2</sup>)를 100%로 잡았을 때 비축상에서의 상면휘도를 나타낸 값인데 계산 결과 각 필드별로 중심에서는 100%, 95.7%(4.56° x 3.42°: 반화각), 82.9%(9.07° x 6.82°), 69.0%(12.59° x 9.51°), 46.1%(17.70° x 13.62°)

표 3. 단매와 대칭 2매 DOE 렌즈의 광학 성능 비교

	1형 (ASP/DOE)	2형 (DOE/ASP)	3형 (ASP/DOE:DOE/ASP)	4형 (DOE/ASP:ASP/DOE)
렌즈형상				
이미지 센서	1/3" (640x480)	1/3" (640x480)	1/3" (640x480)	1/3" (640x480)
유효활상면적(mm)	4.80x3.60	4.80x3.60	4.80x3.60	4.80x3.60
물체화각(deg.)	35.8x27.2	35.4x26.9	48.7x37.5	48.4x37.3
F#	2.8	2.8	2.8	2.8
초점거리(mm)	7.09	7.18	5.17	5.22
입사동직경(mm)	2.65	2.69	1.89	1.90
전장(mm)	6.80	6.80	6.80	6.80
조리개 직경(mm)	1.71	1.73	1.30	1.34
회절링 수(개)	35	43	12	24
유효면 직경(mm, 1면/2면)	3.38/2.03	3.37/2.00	2.72/1.57	2.73/1.61
MTF(0.3, cycles/mm)	32 이상	31.5 이상	32 이상	32 이상
주변광량비(%)	45.3	46.1	48.2	50
왜곡수차(%)	10.0	10.0	2.80	2.57
곡률반경(mm, 1면/2면)	1.86/2.10	1.88/2.39	1.65/1.94	1.70/2.16
1면 굴절능(K <sub>1</sub> )	0.283(K <sub>1</sub> )	0.280(0.962K <sub>ref</sub> ) 0.0111(0.038K <sub>diff</sub> ) 0.292(K <sub>1</sub> )	0.320(K <sub>1</sub> )	0.310(0.973K <sub>ref</sub> ) 0.0085(0.027K <sub>diff</sub> ) 0.318(K <sub>1</sub> )
2면 굴절능(K <sub>2</sub> )	-0.251(1.23K <sub>ref</sub> ) 0.0471(-0.23K <sub>diff</sub> ) -0.204(K <sub>2</sub> )	-0.220(K <sub>2</sub> )	-0.271(1.106K <sub>ref</sub> ) 0.0257(-0.106K <sub>diff</sub> ) -0.245(K <sub>2</sub> )	-0.243(K <sub>2</sub> )
총굴절능	0.141	0.139	0.139	0.136

단, K<sub>1</sub>(또는 K<sub>2</sub>) = K<sub>ref</sub> + K<sub>diff</sub>.



를 가지고 있다. 여기서 제시된 주변광량비는 비축상에서의 광량차폐(Vignetting) 15%를 고려한 계산이다. 그리고 표 3에 제시된 왜곡수치는 자오면과 구결면 상에서 측정된 TV 왜곡수치 값이 아닌 촬상 면적 4.8 mm×3.6 mm에 대한 대각선 방향(지름 6 mm)으로 계산된 값이고 바늘 찜(pincushion) 형태로 최대 10% 값을 갖는다. 10%의 왜곡수치에 대응되는 실제 상의 크기는 6.6 mm로 계산된다. 이 값은 이미지 센서 크기의 한계로 인해 약 92%정도의 필드만 결상할 수 있음을 의미한다. 다음 그림 1에 실제 결상 면적인 1/3인치 이미지 센서(점선 부분)에 대해 왜곡수치로 인해 늘어난 상(실선 부분)을 보여주고 있으니 참조하기 바란다.

다음으로 1형과 2형의 회절링의 수와 회절면의 굴절능을 비교하였다. 회절면을 오목한 면에 사용한 1형은 2.03 mm의 유효직경 내에 35개의 회절링이 있고 굴절면 대비 회절면의 굴절능의 비는 약 18%이다. 반면 볼록면에 회절면을 사용한 2형의 경우 유효직경은 3.37 mm이고 43개의 회절링이 있으나 굴절면 대비 회절면의 굴절능의 비는 3.9% 밖에 되지 않는다. 두 경우에서 회절면의 굴절능이 상호간에 큰 차이를 보이는데 반해, 실제 spot diagram 상에서는 색수차 보정에 있어 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 다음 그림 2를 참조하기 바란다.

한편 1형과 2형의 최대 회절링의 갯수는 각각 35개, 43개이고 링 간격 별로 살펴보면 10 μm~20 μm 사이의 링이 각각 14개(1형), 16개(2형), 20 μm~30 μm의 링은 10개(1형), 9개(2형), 30 μm~40 μm의 링은 7개(1형), 6개(2형), 40 μm~50 μm의 링은 4개(1형), 4개(2형)가 있고, 50 μm 이상의 링은 2형에만 8개 있다. 그리고 최소 링 간격을 살펴보면 1형이 10.7 μm이고 2형은 11.9 μm이다.

결과적으로 회절링의 갯수는 1형이 적지만 피치 간격이 30 μm 이하의 미세한 링의 비율이 각각 68.6%, 58.1%이고 회절면의 굴절능 비가 18%, 3.9%이므로 2형이 나은 것으로 생각된다. 그리고 설계차수 외로 파장별 회절되는 광에 의한 기준상점으로부터의 벗어나는 정도(화면이 겹치는 정도와 역 비례 관계)는 최외각 필드에서 최대가 되는데, 1형의 경우 503 μm이고, 2형의 경우 214 μm이므로 2형 쪽이 더 우수한 광학성

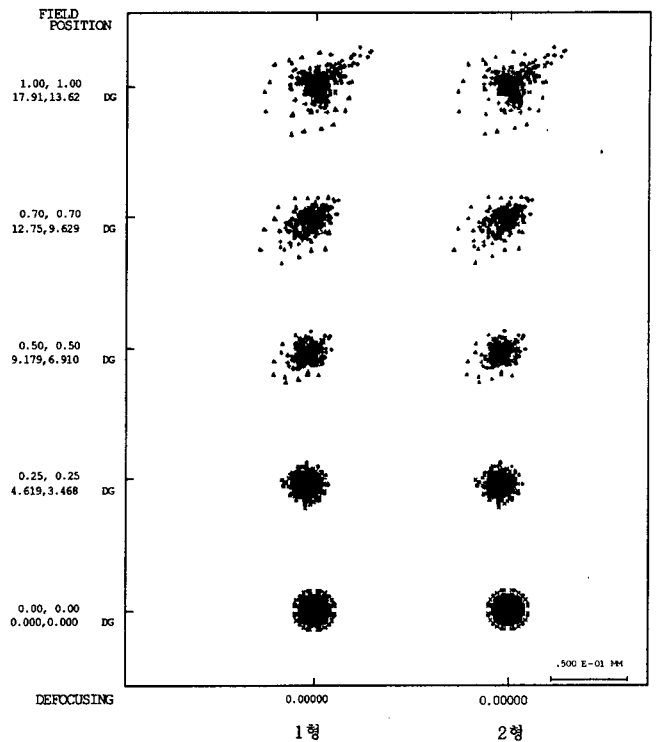


그림 2. 1형과 2형의 spot diagram.

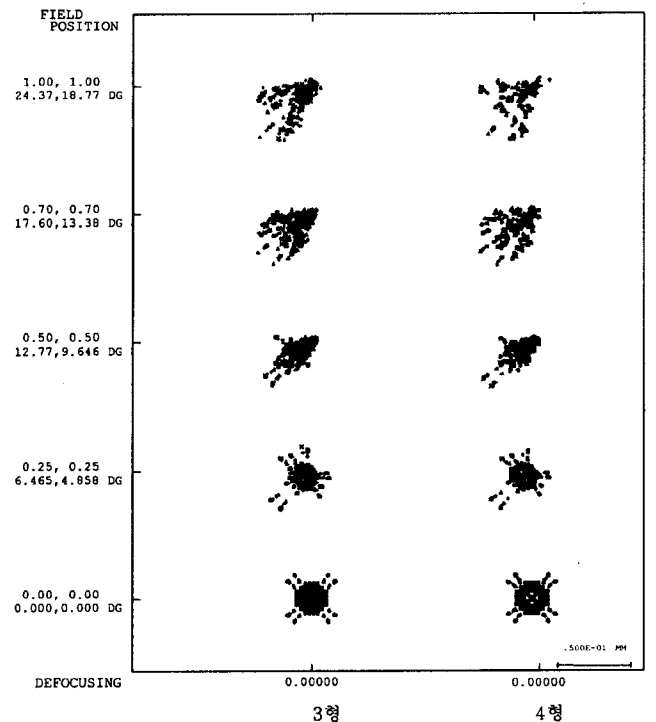


그림 3. 3형과 4형의 spot diagram.

능을 유지할 것으로 예상된다.

### 3.2. 대칭 2매로 구성된 DOE 렌즈의 광학 특성 분석

조리개를 기준으로 렌즈 및 물체와 상면이 정확히 상호 대

칭관계를 가지면(배율=-1) 왜곡수차, 코마, 횡색수차가 제거된다. 즉, 조리개 양쪽에서 발생하는 수차값들이 서로 반대부호를 가지는 것에 기인하는 것인데 예를 들면 왜곡수차의 경우 조리개 앞쪽의 렌즈계에서는 바늘땀(pincushion)형이고 뒤쪽 렌즈계에서는 통(barrel)형으로 절대 값이 같아 결과적으로 상면에서는 왜곡수차가 제거된 형태로 나타난다. 그러나 일반적으로 카메라 렌즈에 있어 정확히 등배율 조건은 성립하지 않더라도 조리개를 기준으로 렌즈계가 대칭성을 가지면 위에서 언급한 수차들은 작은 값들을 가지게 된다. 본 논문에서는 대칭구조를 가지면서 동일렌즈로 구성된 2매의 DOE 렌즈를 설계하였고 광학 특성치들을 표 3에 정리하여 놓았다. 표 3에서 살펴보면 3형과 4형이 대칭형으로 구성된 렌즈계로써, 3형과 4형 상호간의 광학 특성치들은 단매 렌즈에서처럼 회절면에 대한 특성치들(회절링의 갯수, 회절면의 굴절능)을 제외하고 나머지 광학적 특성치들(곡률, 두께, 초점거리, 입사동 직경 등)은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

우선 3형과 4형의 회절링의 수와 회절면의 굴절능을 비교하여 보면 회절면을 오목한 면에 사용한 3형은 1.57 mm의 유효 직경 내에 12개의 회절링이 있고 굴절면 대비 회절면의 굴절능의 비는 약 9.5%이다. 반면 볼록면에 회절면을 사용한 4형의 경우 유효직경은 2.73 mm이고 24개의 회절링이 있으나 굴절면 대비 회절면의 굴절능의 비는 2.7% 밖에 되지 않는다. 3형과 4형에서 굴절면 대비 회절면의 굴절능 차이(9.5% vs. 2.7%)에 의한 색수차보정 효과를 살펴보기 위해 spot diagram을 그림 3에 제시하여 놓았는데 그 차이는 그리 크지 않은 것으로 보인다.

한편 3형과 4형의 최대 회절링의 갯수는 각각 12개, 24개이고 링 간격 별로 살펴보면 10 μm~20 μm 사이의 링은 각각 1개, 6개, 20 μm~30 μm의 링은 3개, 5개, 30 μm~40 μm의 링은 1개, 4개, 40 μm~50 μm의 링은 1개, 1개가 있고, 50 μm 이상인 링이 6개, 8개 있다. 그리고 최소 링 간격을 살펴보면 3형이 18 μm이고 4형은 14 μm이다.

이와 같이 회절링의 수, 피치간격의 조밀성, 최소 링 간격 등으로부터 사출 제작에 의한 형상파괴를 고려하면 3형이 4형보다 우수하다고 판단된다. 즉, 회절면이 조리개 쪽에 위치한 3형이 사출에 의한 대량생산 시 플레어 및 색번짐 현상이 작을 것으로 생각된다. 그러나 회절면의 굴절능의 비가 3형 쪽이 굴절면 대비 약 9.5%인 반면, 4형은 2.7%밖에 되지 않으므로 형상파괴에 의한 민감도는 4형 쪽이 우수하지만 조리개를 기준으로 렌즈간에 대칭형상을 가지므로 약간의 형상파괴

에 의한 성능저하 효과는 3형과 4형간의 차이가 크지 않을 것으로 생각되어 지고, 현재 이 부분에 대해서는 연구 중에 있다(연구가 완료되는 대로 추후 보고할 예정이다.). 3형과 4형의 비교에 있어 흥미로운 결과로써 3형과 4형 모두 설계대로 완벽히 제작되었다고 할 때 굴절 후 회절과 회절 후 굴절의 차이에 의한(즉, 면 배치의 차이) 설계기준과장 외의 회절광에 의한 광학성능저하(플레어 및 색번짐)를 빔경으로 비교해 보면 3형 쪽이 조금 우수한 특성을 보임을 알 수 있는데 이와 관련된 상세한 수치적인 데이터는 표 4에 정리해 놓았다. 표 4의 데이터는 광학성능저하에 가장 큰 영향을 미치는 설계차수 주변의 인접차수에 대해 제시 되어있고 중심(F1)과 최외각 필드(F5)를 기준으로 계산되었음을 유의하기 바란다. 인접차수와 관련된 회절효율은 표 1에서 이미 제시되어 있다.

표 4로부터 알 수 있듯이 설계차수(+1→-1)에서는 3형과 4형의 빔경 내에 들어 있는 에너지 양이 광축상의 필드의 경우 비슷한 값을 가지지만(26.2 vs. 25.9 μm, 84% 기준), 최외각 필드의 경우 같은 에너지를 기준으로 3형 쪽의 직경이 조금 작게 나타난다(53 vs. 60 μm). 그리고, 설계차수 외 즉, +1차에서 -2차로의 회절에서는 각 필드(F1, F5)에 대해 각각 4형(43.5 vs 27.1 μm), 3형이 우수(107.5 vs. 123.1 μm)하고, +1차에서 0차로의 회절에서는 비슷한 빔경(F1: 91.5 vs. 88.7 μm), 4형이 우수(F5: 67.2 vs. 45.0 μm), 0차에서 -1차로의 회절에서는 3형(F1: 108.4 vs. 138.6 μm), 3형이 우수(F5: 95.5 vs. 121.1 μm), +2차에서 -1차로의 회절에서는 3형(F1: 55.9 vs. 71.9 μm), 3형(F5: 161.0 vs. 180.4 μm)이 우수함을 알 수 있다. 즉, 전체적인 관점에서 살펴보면 설계기준과장 외의 회절차수에 의한 회절광의 플레어 및 색번짐 효과는 3형 쪽이 4형에 비해 조금 우수한 특성을 보인다고 생각된다.

이제 단매와 대칭 2매 렌즈간의 성능차 및 광학 특성치들을 비교해 보자. 단매 렌즈는 2형, 대칭 2매 렌즈는 3형을 기준으로 비교 설명하기로 한다. 표 3에서 보는 바와 같이 상의 밝기를 나타내는 척도인 F/#는 단매와 마찬가지로 유한 물체를 기준으로 2.8이고, 물체화각은 48.4°(수평)×37.3°(수직)로 250 mm 거리에서 약 228 mm(수평)×170 mm(수직)크기의 물체크기에 대응되므로 단매(160 mm×120 mm) 대비 물체화각이 많이 커졌음을 확인 할 수 있다. 이는 단매 및 동일 2매 모두 전장길이 6.8 mm에서 최적의 성능을 확보하도록 초점거리를 정하였기 때문으로 단매의 경우 초점거리가 7.18 mm이고, 대칭 2매의 경우는 5.17 mm이다. 여기서 물체화각은 공기중에서 주요점과 마디점(nodal point)이 일치하므로 (이미지 센

표 4. 대칭 2매 렌즈의 회절차수에 따른 빔경과 에너지 분포와의 관계(단위 : μm)

	렌즈위치		직경내에 포함된 에너지 양(F1)				직경내에 포함된 에너지 양(F5)				
	조리개 앞	조리개 뒤	50%	84%	90%	100%	50%	84%	90%	100%	
3형 (4형)	+1	-2	30.6(17.2)	43.5 (27.1)	47.8 (39.0)	59.3 (45.2)	55.7 (49.5)	107.5(123.1)	124.3(143.1)	233.6(252.7)	
	(설계	-1	15.4(15.5)	26.2 (25.9)	32.3 (32.1)	52.3 (51.1)	20.1 (18.6)	53.0 (60.0)	63.8 (72.2)	119.0(117.0)	
	차수)	0	62.9(54.4)	91.5 (88.7)	100.4(103.1)	136.5(134.7)	30.5 (26.5)	67.2 (45.0)	75.3 (52.5)	128.1(101.5)	
		0	-1	69.3(88.1)	108.4(138.6)	119.3(158.5)	159.8(213.9)	38.9 (45.9)	95.5(121.1)	118.3(140.9)	199.3(255.4)
		+1	(설계	15.4(15.5)	26.2 (25.9)	32.3 (32.1)	52.3 (51.1)	20.1 (18.6)	53.0 (60.0)	63.8 (72.2)	119.0(117.0)
	+2	차수)	41.4(48.1)	55.9 (71.9)	62.6 (79.4)	88.9(106.2)	90.8(117.2)	161.0(180.4)	180.1(193.9)	260.4(248.9)	

서크기)/(제 2 주요면에서 상면까지 거리)로 주어짐을 이용하여 계산할 수 있다. 이미지 센서의 크기는 4.8 mm(수평)×3.6 mm(수직)이므로 0.02(약 1/50)의 축소배율을 갖고, 픽셀 크기 7.5 μm×7.5 μm를 기준으로 볼 때 한 픽셀에 대응되는 물체 크기(최소 분해할 수 있는 물체 크기)는 약 0.38 mm로 주어짐을 알 수 있다(Rayleigh 규약을 따르면 0.38/2=0.19 mm로 주어질 수도 있다).

MTF를 살펴보면 대칭 2매 렌즈는 단매 렌즈와 유사한 성능을 가지지만 한가지 유의 할 점은 물체화각이 단매에 비해 크다는 것이다(160 mm×120 mm vs. 228 mm×170 mm). 표 3에서 보듯이 MTF는 전 상고, 전 파장 영역에 걸쳐 0.3을 기준으로 32 cycles/mm 이상의 공간주파수 값을 나타내고 있다. 표 4에서 84%의 에너지를 포함하는 빔 반경(중심 : 13 μm, 최외각 : 27 μm)은 Airy 디스크의 반경에 대응되는 값으로 분해능한계(Rayleigh 기준)를 의미하는데, 이를 물체면에서 최소 분해할 수 있는 물체크기로 환산하면 0.65 mm(중심), 1.35 mm(최외각)이므로, 이미지 센서의 분해능한계 0.19 mm와 비교하면 꽤 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 입사각에 따른 주변광량비 역시 단매 렌즈와 비슷한 수치를 보이고 있지만 물체화각면에서 3형 쪽이 훨씬 크다는 것을 유의하기 바란다. 각 필드별로 살펴보면(3형) 중심에서는 100%, 95.8%(6.42°×4.82°), 84.9%(12.68°×9.58°), 72.9%(17.48°×13.29°), 50.4%(24.22°×18.64°)를 가진다. 대각선 방향(지름 6 mm)에 대한 왜곡수차는 바늘땀(pincushion) 형태로 최대 2.8% 값을 갖는데 10%의 왜곡수차를 가지는 단매에 비해 약 1/3.5로 감소된 우수한 특성을 가진다. 실제 결상 면적(점선 부분) 대비 왜곡수차로 인해 늘어난 상(일점 쇄선 부분)을 그림 1에 나타내었으니 단매의 경우(실선 부분)와 비교해보기 바란다.

단매와 비교할 때 흥미로운 사실은, 실제 제작 후 렌즈성능을 좌우하는 플레어 및 색번짐 문제에 있어 대칭 2매 쪽이 훨씬 우수하다고 생각된다는 것이다. 회절링의 수에 있어 2형(단매)과 3형(동일 2매)을 비교하면 각각 43개, 12개이고, 미세한 링의 피치 간격을 살펴보면 10 μm~20 μm 사이의 링이 각각 16개, 1개, 20 μm~30 μm의 링이 9개, 3개, 30 μm~40 μm 사이의 링이 6개, 1개 등 사출성형 시 미세한 링의 프로파일(형상)이 제대로 만들어지지 않아 발생하는 문제점이 대폭 개선될 수 있다는 것을 제시하고 있다. 덧붙여 최소 피치 크기도 11.9 μm 대 18 μm임을 지적하고자 한다.

설계파장 외의 회절차수로의 광량 분배에 의한 플레어 및 색번짐 효과를 살펴보기 위해, 단매(2형)에 대한 설계 차수(+1) 및 주변차수(0, +2)의 빔경을 표로 정리하였다(표 5참조). 표 4와 5로부터 알 수 있듯이 설계차수에서는 2형과 3형의

빔경이 광축상에서는 비슷한 값(24.2 μm vs. 26.2 μm, 84%기준)을 가지고 최외각 필드에서는 2형 쪽이 더 작게 나타난다(26.8 μm vs. 55.0 μm). 하지만 여기서 고려해야할 점으로 단매인 2형의 물체화각은 35.4°(수평)×26.9°(수직)이고, 대칭 2매인 3형의 물체화각은 48.4°(수평)×37.3°(수직)라는 것이다. 한편 설계차수 외로 회절된 광에 의한 결상빔경의 크기(플레어 및 색번짐)는 중심 및 최외각 필드 모두 대칭 2매인 3형 쪽이 훨씬 작은 값을 갖는다. 그 값들을 살펴보면 중심에서는 221.3 μm~407.8 μm(2형) 대 43.5 μm~108.4 μm(3형)이고, 최외각에서는 295.1 μm~410.4 μm(2형) 대 67.2 μm~161.0 μm(3형)이다. 즉, 현재 DOE 렌즈에서 가장 큰 문제로 인식되고 있는 해상력 저하 및 색번짐의 주요인인 설계차수 외로 회절된 광에 의한 성능저하가 대칭 2매 쪽이 훨씬 우수한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 여기서 주의할 점은 회절면의 프로파일 완벽히 제작되었다는 것을 가정한 것으로써 실 제작에 의한 형상파괴는 고려하지 않은 것이다. 앞서 설명한 것처럼 회절면의 형상파괴에 의한 상면에서의 결상성능 저하에 있어서도 대칭 구성의 경우 상호 보완하는 효과가 있을 것으로 예상하나 단매의 경우는 그마저도 없을 것으로 생각되어 지므로 실 제작에 의한 상의 질은 대칭 2매 쪽이 훨씬 우수할 것으로 예상된다. 현재 이 부분에 대한 연구는 진행 중에 있으며 연구가 완료되는 대로 발표할 예정이다.

살펴본 바와 같이 결론적으로 단매 대비 대칭 2매의 렌즈는 넓은 화각 및 왜곡수차의 향상과 더불어 회절면에 의한 결상성능 저하에 있어서도 높은 성능을 보여줄 것으로 생각되어진다.

#### IV. 전장길이 축소에 따른 광학성능 변화

지금까지 F/2.8, 전장길이 6.8 mm인 1/3 인치용 DOE 렌즈(1형에서 4형까지)에 대한 광학적 특성들과 성능에 대해 살펴 보았다. 본 절에서는 요즘 화상통신 카메라의 소형화 추세에 따라, 설계된 대칭 2매 렌즈의 전장길이를 6.8 mm에서 5.8 mm, 4.8 mm로 축소시켰을 때의 광학성능 및 특성치들의 변화도 살펴보았다.

각각 전장길이에 대해 최적설계시 초점거리는 5.2 mm로 유지하면서 이미지센서의 크기는 1/3 인치를 기준으로 하였기에 전장길이가 짧아지더라도 광학계가 갖는 화각(2θ)은 tanθ= 이미지 높이/초점거리 라는 관계식으로부터 모두 48.74°×37.54°로 고정된다. 전장길이가 짧아짐에 따라(6.8 mm→4.8 mm) 주목할 만한 광학성능의 변화는 대각선 방향에 대한 왜곡수차의 양으로 2.8%에서 -15.2%, -31.6%로 매우 큰 값을 갖는다. 통상 사용되는 화상 결상용 광학계에서 허용할 수 있는 최대

표 5. 단매(2형) 렌즈의 회절차수에 따른 빔경과 에너지 분포와의 관계.(단위 : μm)

PCT	직경내에 포함된 에너지 양(F1)				직경내에 포함된 에너지 양(F5)			
	50%	84%	90%	100%	50%	84%	90%	100%
회절차수								
0	224.6	407.8	495.3	707.5	225.6	410.4	479.0	720.0
+1(설계차수)	14.0	24.2	26.3	29.4	16.0	26.8	30.4	61.2
+2	137.6	221.3	239.5	332.4	203.7	295.1	314.6	476.7

표 6. 전장길이 축소에 따른 광학성능의 변화.

전장길이	6.8 mm (3형)	5.8 mm	4.8 mm
이미지 센서	1/3" (640×480)	1/3" (640×480)	1/3" (640×480)
유효촬상면적(mm)	4.8×3.6	4.8×3.6	4.8×3.6
물체화각(deg.)	48.7×37.5	48.7×37.5	48.7×37.5
F#	2.80	2.80	2.80
초점거리(mm)	5.19	5.19	5.19
입사동직경(mm)	1.89	1.89	1.89
조리개 직경(mm)	1.30	1.47	1.63
회절링 수(개)	12	11	13
유효면직경(mm, 1면/2면)	2.72/1.57	2.55/1.67	2.34/1.69
MTF(0.3, cycles/mm)	32.0 이상	19.0	11.3
주변광량비(%)	48.2	55.8	59.8
왜곡수차(%)	2.80	-15.2	-31.6
렌즈두께(mm)	1.25	1.0	0.875

왜곡수차는 약 10% 정도이므로 최소 전장길이는 5.8 mm 이상이 요구됨을 알 수 있다. 결과적으로 전장길이가 짧아짐에 따라 급격히 왜곡수차량이 증가함을 알 수 있다.

전체 상고 및 전 파장대역에 걸쳐 전장길이 변화에 따른 공간주파수의 변화를 살펴보면 32 cycles/mm(MTF 0.3 기준, 6.8 mm), 19 cycles/mm(5.8 mm), 11.3 cycles/mm(4.8 mm)로 급격히 떨어지는 반면, 주변광량비는 각각 50.4%(6.8 mm), 55.8%(5.8 mm), 59.8%(4.8 mm)로 오히려 소폭 증가하고 있다. 이것은 비축광량차폐량(vignetting)이 전장 길이가 줄어들어 따라 같이 약간 줄어들기 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다.

그리고 흥미로운 결과로써 전장길이의 변화(6.8→5.8→4.8 mm)에 따른 회절링의 갯수는 표 6에서 보듯이 큰 차이가 없다는 것을 밝혀두고자 한다(12개, 11개, 13개).

### V. 결 론

본 논문에서는 단매와 대칭 2매로 구성된 DOE 렌즈의 광학성능을 비교·분석하기 위하여 1/3 인치 이미지 센서(크기 4.8 mm×3.6 mm)에 대해 f/2.8, 전장길이(이미지 면 포함 거리) 6.8 mm로 최적 설계를 하였다. 설계시 각 구성에 대해 두 가지 유형으로 나누어 설계하였고, 먼저 각 유형별로 비교·평가한 후, 그 중 우수한 특성을 보이는 유형(단매:2형, 2매:3형)을 선택하여 단매 및 대칭 2매에 대해 광학성능 및 특성치들을 비교하고 분석했다.

단매 렌즈의 경우 두 가지 유형에 있어서 회절면과 관련된 특성치들(플레어 및 색번짐의 주요인)을 제외하고 나머지 광학특성치들은 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 회절링의 개수(35 vs. 43), 회절링의 피치 간격(또는 미세한 링의 비율), 회절면의 굴절능 비(18% vs. 3.9%), 설계차수외로 파장별 회절되는 광에 의한 기준상점으로부터 벗어나는 정도 및 대응되는 빔경(503 μm vs. 214 μm)과 같은 회절면 관련 특성치들을 비교·분석한 결과 볼록, 오목 형상을 가지면서 볼록면에는 굴절/회절 혼합면, 오목면에는 비구면의 유형이 우수한 특성을 보일 것으로 판단되었다.

역시 대칭 2매의 두 가지 유형에 대해서도 단매의 경우와 같은 비교 조건을 가지고 분석·평가한 결과 볼록/오목, 오목

/볼록 형상을 가지면서 볼록면에는 비구면, 오목면에는 굴절/회절 혼합면의 유형이 우수한 특성의 렌즈로 판단되었다.

결론적으로 단매와 대칭 2매의 비교에 있어서 대칭 2매 쪽이 훨씬 우수한 광학 성능을 보이고 있음이 판단되었다. 그 항목들을 열거하면 같은 해상력 하(31.5 cycles/mm 이상)에서 물체의 시야는 160×120 mm 대비 228×170 mm로 커졌고, 왜곡수차는 10% 대비 2.8%로 감소하였다. 플레어 및 색번짐의 주요인 인 회절면 관련 특성치들을 살펴보면 회절링의 갯수는 43개 대비 12개로 감소하였고, 미세한 링의 피치 간격 수 또한 대폭 감소하였으며 설계차수 외로 파장별 회절되는 광에 의해 최외각 필드에서 기준상점으로부터 벗어나는 정도(213 μm 대 127 μm) 및 대응되는 빔경(중심: 407.8 μm 대 108.4 μm, 최외각: 410.4 μm 대 161.0 μm)도 우수한 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 단매 DOE 렌즈의 단점으로 여겨지는 유효직경 내의 많은 회절링의 수, 설계차수 외로 파장별 회절되는 광에 의해 화면에 나타나는 플레어 및 색번짐, 큰 왜곡수차 등을 대칭 2매의 렌즈를 사용함에 의해 최소가 되도록 하였다. 그리고 대칭구성으로 말미암아 양산시 초기 투자되는 금형비용을 최소로 하여 저가화를 실현할 수 있었고, 양산 조립시 공차 특성 또한 우수할 것으로 생각되어진다.

### 감사의 글

본 논문은 2000년도 한남대학교 교비학술연구비로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 이환선, 임천석, 조재홍, 장수 “초소형 영상 전송 모듈용 DOE(Diffractive Optical Element) 렌즈의 설계 및 평가,” 한국광학회지, 제 12권 3호, pp. 240-249, 2001.
- [2] W. C. Sweatt, “New method of design holographic optical element,” *SPIE*, vol. 126, pp. 46-53, 1977.
- [3] W. C. Sweatt, “Describing and constructing thick holographic optical elements,” *Appl. Opt.* vol. 17, no. 8, pp. 1220-1227, 1978.

- [4] W. C. Sweatt, "Mathematical equivalence between a holographic optical element and an ultra-high index lens," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 69, 486-487, 1979.
- [5] 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.
- [6] Y. Ghi, S. I. Hong, W. G. Yeo, and C. K. Lee, "Telephotolens design with refractive/diffractive hybrid lens," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 1, no. 2, pp. 74-80, 1997.
- [7] D. A. Buralli, G. M. Morris, and J. R. Rogers, "Optical performance of holographic kinoforms," *Appl. Opt.*, vol. 28, pp. 976, 1989.
- [8] M. B. Fleming and M. C. Hutley, "Blazed diffractive optics," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 20, 4635-4643, 1997.
- [9] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering* (McGraw-Hill, Inc., 1990)
- [10] 이상수, 기하광학(교학연구소, 서울, 1985), 4장.
- [11] Y. Ogata and Akiruno, "Lens system including a diffractive optical element," U.S. Patent 5949577, 1999.
- [12] T. Stone and N. George, "Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats," *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 14, pp. 2960-2971, 1988.
- [13] *CODE V Reference Manual* (Version 9.00).

### The comparison and the Analysis of the optical performances between the single and the symmetrical double DOE lenses

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

*Applied Optics and Electromagnetics, School of Nature Science, Hannam University, Daejeon 306-791, KOREA*

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

(Received March 5, 2002 ; revised manuscript received April 1, 2002)

In this paper, we design single and symmetrical double lenses with DOE. The specifications are the following : Image area is 4.8 mm × 3.6 mm, F/# is 2.8 and the overall length (from first lens surface to image plane) is 6.8 mm. After comparing the optical performance and characteristic values, we determine that symmetrical double lenses are superior to single lenses. Symmetrical double lenses have the merits of fewer zones, weaker flare, and smaller distortion than single lenses.

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