

# 1매의 구면 SELFOC 렌즈와 1매의 비구면 플라스틱 렌즈로 구성된 카메라폰용 광학계의 설계

이용선 · 이종웅<sup>†</sup>

청주대학교 레이저광정보공학과

Ⓞ 360-764 충청북도 청주시 상당구 내덕동 36번지

(2008년 1월 16일 받음, 2008년 3월 6일 수정본 받음)

구면 SELFOC 렌즈와 플라스틱 비구면 렌즈를 사용하여 mobile phone 광학계를 설계하였다. SELFOC 소재는 radial GRIN (gradient index) 분포를 가지며, 이것은 설계에 추가적인 자유도를 제공하므로, 비구면을 구면으로 대체할 수 있다. 두개의 플라스틱 비구면 렌즈로 구성된 통상적인 2P 광학계와 결상특성을 비교 하였다. 이 연구에서는 시판되고 있는 SELFOC 소재를 사용하여 1GRIN 1P 광학계를 설계하였다. 그러나 1GRIN 1P의 성능보다 통상적인 2P 광학계의 성능이 좋았다. 1GRIN 1P 설계에서 성능은 GRIN 소재의 굴절률 구배에 의지하므로 굴절률 구배가 클수록 좋은 성능을 보인다. 그러므로 큰 굴절률 구배를 갖는 가상의 GRIN 소재를 사용하여 광학계를 설계하였다. 현재 시판되는 SELFOC 소재보다 3배 정도 굴절률 구배가 큰 GRIN 소재가 개발된다면, 1GRIN 1P 광학계의 성능이 통상적인 2P 광학계의 성능과 유사하거나 더 좋아 질 것이다.

주제어: Gradient-index lenses, SELFOC lens, Lens design

## I. 서 론

1839년 최초의 카메라가 알폰스 지로에 의해 발명된 이후,<sup>[1]</sup> 카메라 기술은 20세기 후반에 급속히 발전하여 필름카메라에 이어 1990년대 말 100만 화소급의 디지털 카메라들이 개발 보급되기 시작하였다. 2001년에 일본 J-Phone에서 최초로 디지털 카메라가 장착된 휴대전화를 출시하여 카메라 폰의 효시가 되었다. 현재 카메라는 크게 필름카메라, DSC (digital still camera)로 분류되고 있으나, 추가로 카메라폰이 카메라의 한 분야로 자리 잡아 가고 있다.

필름카메라는 역사가 깊은 만큼 렌즈와 메커니즘이 매우 발달하여 최고급 화질의 카메라로 발전하여 왔고 DSC는 CCD (charge coupled device) 센서의 발전과 DSP(digital signal processing)의 속도 향상으로 휴대성 및 편리성이 증가되어 일반 대중 용도로 널리 보급되고 있다. 이러한 발전 속에 CMOS(complementary metal oxide) 영상 센서와 플라스틱 렌즈의 대량생산 체계가 구축되어 휴대폰에 소형 카메라 장착이 가능하게 되었다. 최근 휴대폰에 장착되는 영상센서의 화소수가 증가함에 따라 자동초점, 손떨림방지 등과 같은 고성능, 고기능화가 요구되고 있다. 또한 휴대폰의 초소형화에 따른 카메라 모듈의 소형화, slim화에 대한 요구도 점차 증대되고 있다. 그러나 기존의 방식으로는 슬림화 설계는 한계에 다다랐고, 새로운 시도로서 GRIN 소재를 적용한 카메라 폰용 렌즈설계에 대하여 연구하게 되었다.

광학계 설계의 많은 경우에 여러 수차를 조절하기 위해 서

로 다른 굴절률과 분산특성을 가진 렌즈의 조합이 필요하며, 고성능 광학계에는 여러 장의 렌즈와 비구면이 사용되고 있다. GRIN 렌즈는 기존의 균일한 유리에 비해 수차보정에 대한 새로운 자유도를 제공함으로써 광학계의 렌즈 매수를 감소시키거나, 구면 렌즈를 사용하여 설계를 단순화 시킬 수 있다.

이 연구에서는 일반적으로 사용되는 플라스틱 또는 유리 비구면 렌즈 대신 radial GRIN 소재를 사용한 mobile phone 광학계의 설계에 대하여 연구하였다. GRIN 렌즈의 경우 현재의 기술로는 비구면의 제작이 어려우므로 구면만을 사용하였다. 이 때문에 최소한의 렌즈 매수로 구성되는 카메라 폰 광학계에서는 일반 비구면 렌즈와 비교하여 수차의 보정에 한계가 따른다. 이 연구에서는 이를 고려하여 2매 구성의 VGA(video graphics array)급 카메라 폰 렌즈설계의 첫 번째 렌즈에 radial GRIN의 일종인 SELFOC 구면 렌즈를 사용하였으며, 기존의 비구면 플라스틱 렌즈 2매 구성의 광학계와 특성을 비교하였다.

기존의 SELFOC 소재를 이용한 설계에서는 소재의 굴절률 구배가 크면 클수록 보다 좋은 결상 특성을 보였으나, 통상적인 2P 비구면 광학계에 비하여 결상 성능이 떨어진다. 이 문제점을 해결하기 위하여 보다 굴절률 구배가 큰 가상의 SELFOC 소재를 이용한 설계를 시도하여 보았으며, 그 결과 현재 직경 1 mm급의 SELFOC 소재에서 중심과 주변의 굴절률 차는 0.038정도이나 이를 0.1 정도까지 올릴 수 있다면, 통상적인 2P 비구면 광학계보다 우수한 결상 특성을 가진 렌즈를 설계할 수 있음을 알 수 있었다.

<sup>†</sup>E-mail: julee@cju.ac.kr

## II. Radial GRIN 소재

GRIN 소재의 일반화된 굴절률 분포함수는 다음과 같은 굴절률 다항식으로 표현된다.

$$N(r, z) = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} N_{ij} r^{2i} z^j \quad (1)$$

여기서,  $r$ 은 광선의 높이를 나타내는 radial 좌표,  $z$ 는 광축 좌표이고  $N_{ij}$ 은 굴절률 다항식의 계수를 나타낸다. 이 굴절률 다항식은 GRIN 소재의 수치를 계산하기 위하여 Sands에 의해 최초로 사용되었다.<sup>[2,3]</sup> 계수  $N_{ij}$ 은 파장에 따라 달라지며 일반적으로  $d$ -선(0.5876  $\mu\text{m}$ ),  $F$ -선(0.4861  $\mu\text{m}$ )과  $C$ -선(0.6563  $\mu\text{m}$ ) 세 파장의 계수가 사용된다.

Radial GRIN 소재는 굴절률  $n$ 이 그림 1에서 보는 바와 같이, 광축으로부터 방사상 거리  $r$ 의 함수로 원주 대칭을 갖는 굴절률 분포를 갖는 소재이다.

Radial GRIN 소재의 굴절률 분포함수<sup>[4,5]</sup>는 식 (1)에서 radial 좌표  $r$ 과 다항식 계수  $N_{i0}$ 만을 갖게 되어

$$N(r) = N_{00} + N_{10}r^2 + N_{20}r^4 + \dots \quad (2)$$

로 전개된다.

NSG사의 SELFOC 소재는 radial GRIN의 일종으로서, 굴절률 분포는 radial 좌표  $r$ 과 quadratic constant  $A$ 로 다음과 같이 표시되어 있다.

$$N(r) = N_0(1 - Ar^2/2 + h_4r^4 + h_6r^6 + \dots) \quad (3)$$

이것을 radial GRIN에 대한 식 (2)과 비교하면

$$N_{00} = N_0, N_{10} = -N_0A/2 \quad (4)$$

가 된다. 그림 2와 같이 식 (4)의 SELFOC 소재를 사용하는 두께  $t$ 의 평판 렌즈의 굴절능  $\phi$ 는

$$\phi = N_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A} t) \quad (5)$$

로 주어지며, 매질의 길이에 따라 굴절능은 양 또는 음, 또는 0이 될 수 있다. 평판 SELFOC 렌즈의 주기적인 결상과 반

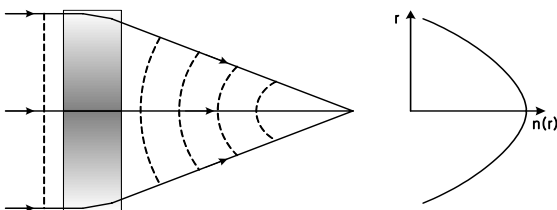


그림 1. Radial GRIN 소재의 굴절률 분포.

복 주기(pitch)를 보여주고 있으며 렌즈의 두께가 얇다면 (5) 식에서 굴절능  $\phi$ 는

$$\phi \approx N_0 A t \quad (6)$$

로 근사될 수 있다.

## III. SELFOC 렌즈를 이용한 Mobile Phone 광학계 설계

NSG사의 SELFOC 소재의 굴절률 분포<sup>[6]</sup>는

$$n(r) = n_0 \left\{ 1 - \frac{(\sqrt{A} \times r)^2}{2} \right\} \quad (7)$$

로 주어지고 있다. 여기서  $n_0$ 는 광축의 굴절률,  $A$ 는 quadratic constant이다. SELFOC 렌즈의 재질 및 종류는 SLW와 SLH의 두 가지 type으로 나뉘는데 각각 SELFOC wide와 SELFOC high의 약자로 wide와 high는 field of view에 관계되고, 이름은 재질의 형태와 직경을 혼합해 사용하고 있다.

이 연구에서는 SELFOC 소재의 특성을 파악하기 위하여 SLW10, SLW18, SLH18을 사용하여 비교하였다. 최적화에는 Code-V를 이용하였고, 일반적인 플라스틱 비구면이 아닌 첫 번째 렌즈가 구면으로 구성된 1GRIN 1P의 구성으로 최적화하였고, 통상적인 비구면 2P 광학계와 수차 및 MTF를 비교하였다.

그림 3에는 각각의 SELFOC 소재에 대한 굴절률 변화를

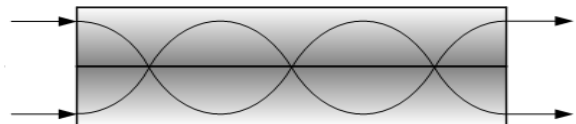


그림 2. 주기적인 광로를 갖는 radial GRIN 렌즈.

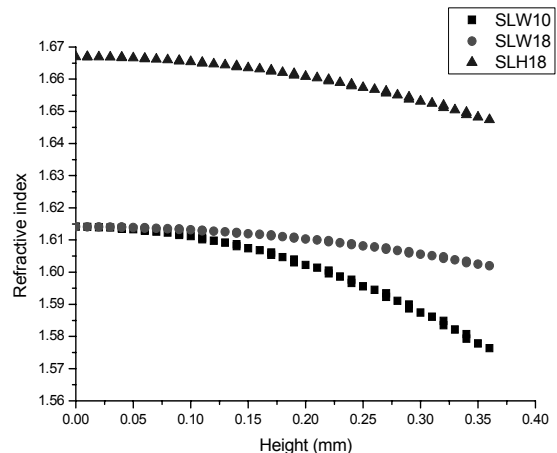


그림 3. SELFOC 소재의 굴절률 분포.

나타내었고, 표 1에는 시험설계에 사용된 SELFOC 소재의 특성이 정리되어 있다. 굴절률이 가장 높은 것은 SLH18이고, 굴절률 구배가 가장 큰 것은 SLW10이다.

**3.1 설계조건 및 사양**

설계 목표 사양은 VGA급 mobile phone 광학계의 사양을 참조하여 결정하였다. F/수는 3.0으로 하였고, 60.0~68.0°의 화각에 적합하도록 EFL을 설정하였다. 센서의 크기보다 전장 길이가 길어야 성능을 유지할 수 있기 때문에 광학계 전장은 센서 크기보다 더 크게 설정하였다. 영상 센서는 Magnachip사의 VGA 1/7.4 센서를 가정하였다.

VGA급 mobile phone 광학계의 설계 목표 사양과 센서 사양은 표 2에 정리하였다.

**3.2 광학계 설계 및 평가**

앞 절에서의 설계 사양을 바탕으로 Code-V를 이용하여 최적화를 수행하였으며, 최적화의 제한조건으로는 크게 세 가지로 나누어 고려하였다.

표 1. SELFOC 소재의 특성

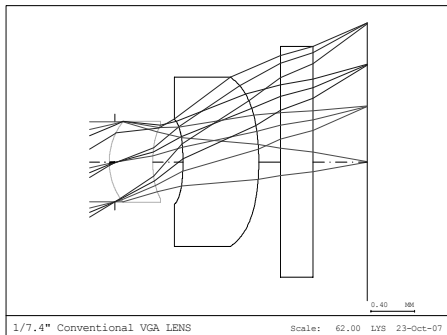
Type	굴절률 범위( $n_d$ )	$\Delta n_d$	A
SLW10	1.6141~1.5763	0.0378	0.373
SLW18	1.6141~1.6020	0.0121	0.118
SLH18	1.6670~1.6474	0.0196	0.190

첫 번째는 렌즈의 최소 두께는 0.4 mm 이상, 최대 두께는 0.9 mm 이하로 하였다. 두 번째로는 전체 렌즈계의 전장을 2.6 mm 이내로 하여 소형화된 mobile phone camera 광학계를 구현하려 하였다. 세 번째로는 optical distortion  $\pm 1.0\%$  이내, TV distortion  $\pm 1.0\%$  이내로 구현하려 하였다.

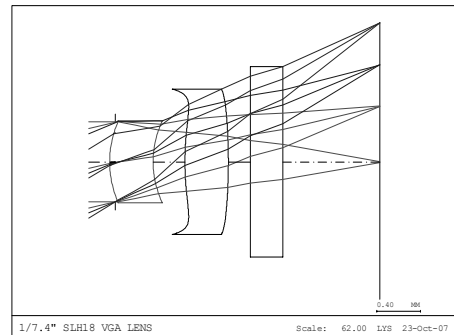
그림 4는 설계된 광학계의 형태를 보여주고 있으며, SELFOC 소재를 사용한 설계가 일반적인 2P 렌즈보다 두 번째 렌즈의 두께가 얇다. SLW18과 SLH18의 설계는 모양이 비슷하

표 2. VGA급 Mobile Phone 광학계의 설계 목표 사양

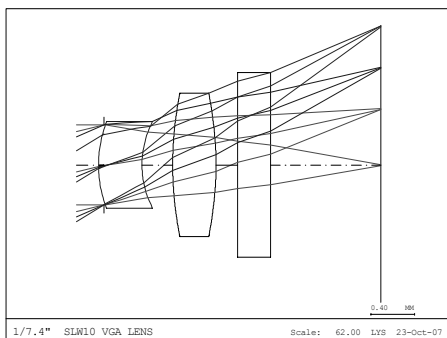
항목	설계 목표	
TTL	< 2.60 mm	
EFL	1.78~2.08 mm	
BFL	> 1.00 mm	
Relative Illumination	> 50.0% (at 1.0 Field)	
F/수	< 3.0	
Distortion	Optical	< $\pm 1.0\%$
	TV	< $\pm 1.0\%$
Field of view	60~68°	
MTF	0.0 F	>30% R/T (at 120 lp/mm)
	0.4 F	>30% R/T (at 120 lp/mm)
	0.7 F	>30% R/T (at 120 lp/mm)
	1.0 F	>30% R/T (at 120 lp/mm)
Composition	2 Elements	
Sensor size	1/7.4" Pixel: 3 $\mu\text{m}$ ( $\phi$ 2.4 mm)	



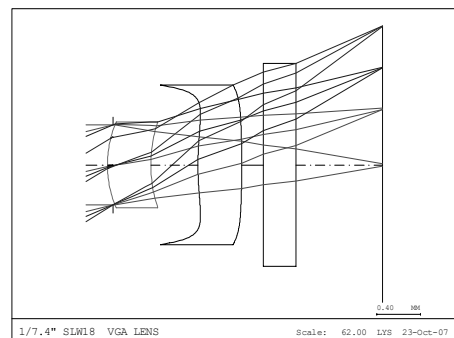
(a) Conventional



(b) SLH18



(c) SLW10



(d) SLW18

그림 4. VGA급 Mobile Phone 광학계의 단면도.

며, SLW10의 설계만 제 3면의 모양이 다른데, 그것은 제 3면의 비구면 변형이 다른 설계와는 반대방향으로 발생하고 있기 때문이다. 이것은 제1면 렌즈를 radial GRIN을 사용한 1GRIN 1P 렌즈에 2개의 local minimum이 있다는 것을 시사한다.

그림 5는 유한 광선 수차도로서 SELFOC 렌즈 사용 시 색 수차 보정이 미흡함을 알 수 있다. 자오-구결상면 만곡, 왜곡 수차는 통상적인 2P 비구면 광학계와 유사한 수준이다.

그림 6은 각각의 광학계에 대한 MTF를 보여주고 있다. 플라스틱 2매를 사용한 경우가 각 시야 내에서 MTF가 30%를 넘어 설계목표를 만족하고 있다. 표 3은 광학계의 설계 결과를 표로 정리한 것이다. 전반적으로 2P의 비구면 렌즈 2매로 설계한 광학계가 가장 좋은 특성을 보이고 있고, 현재의 설계에서는 구면 GRIN 렌즈가 비구면 플라스틱 렌즈를 완전히 대체할 만한 성능은 가지고 있지 않음을 보여주고 있다. 그러나 구면 GRIN 렌즈를 사용한 설계를 비교해 보면, 굴절률 구배가 큰 SLH18의 결상 성능이 가장 우수함을 알 수 있다. SLH18의 굴절률 차는 0.038이며, 만약 이 보다 큰 굴절

률차를 줄 수 있다면 보다 좋은 결상 특성을 가진 광학계의 설계가 가능할 것으로 생각된다.

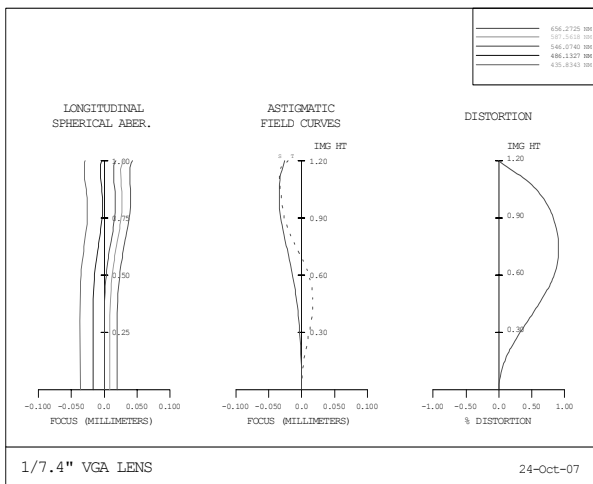
#### IV. 가상의 Radial GRIN 소재를 이용한 Mobile Phone 광학계 설계

##### 4.1 가상의 GRIN 소재

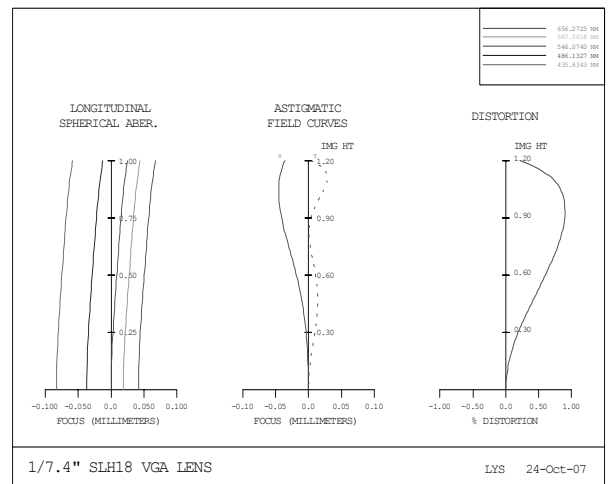
Rochester 대학에서 제안된 gradient에 대한 굴절률 분포함수<sup>[7]</sup>는

$$n(r, z) = n_{00} \left\{ \begin{array}{l} +n_{01}z + n_{02}z^2 + n_{03}z^3 + n_{04}z^4 \\ +n_{10}r^2 + n_{20}z^4 + n_{30}z^6 + n_{40}z^8 \end{array} \right\} \quad (8)$$

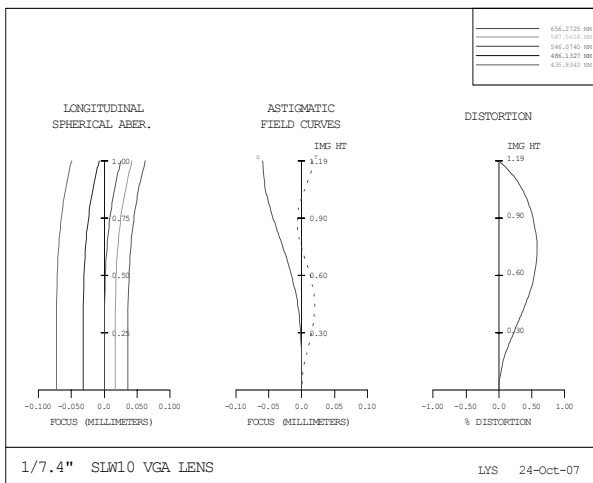
로 주어지고 있다. 여기서  $n_{00}$ 는 광축의 굴절률,  $n_{0i}$ ,  $n_{j0}$ 는 각각 axial GRIN 렌즈와 radial GRIN 렌즈에 대한 계수이다. 본 연구에서는 식 (8)을 이용하여 보다 큰 굴절률 구배를 가



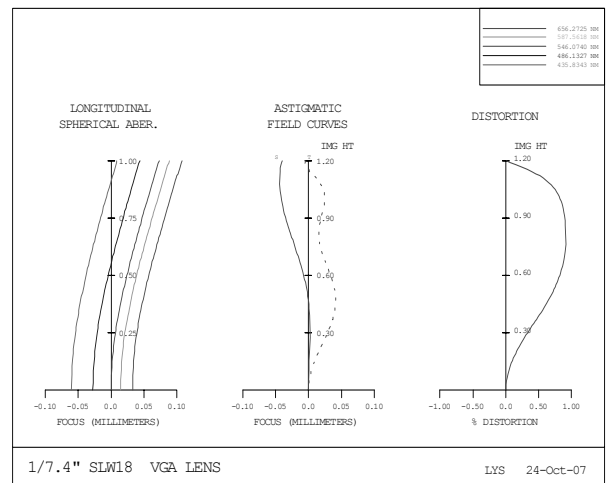
(a) Conventional



(b) SLH18

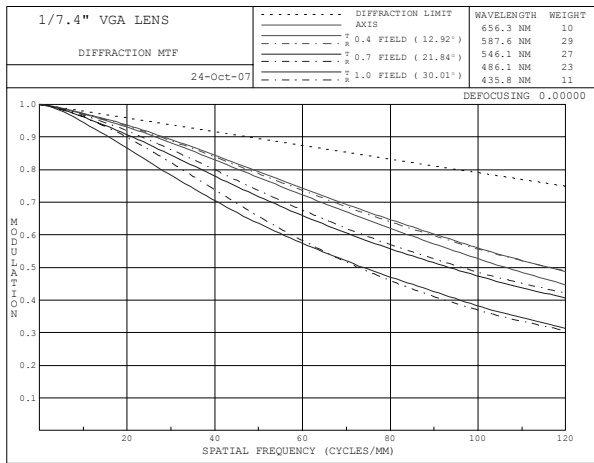


(c) SLW10

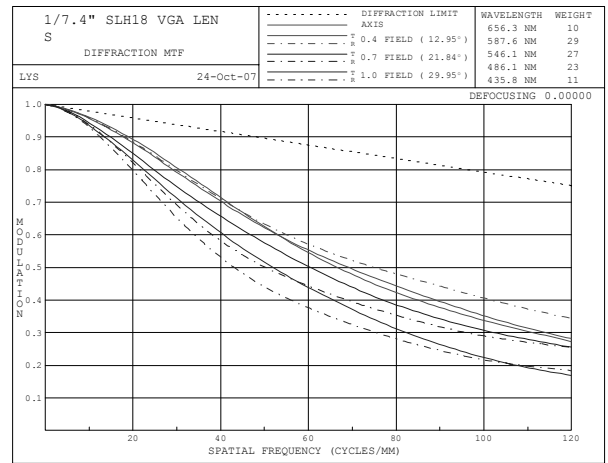


(d) SLW18

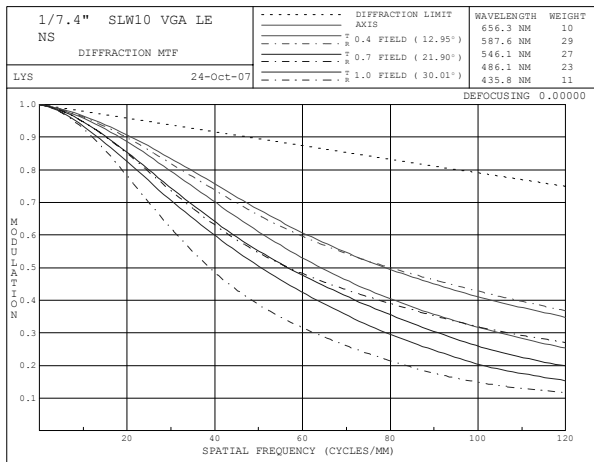
그림 5. VGA급 Mobile Phone 광학계의 유한 광선 수차도.



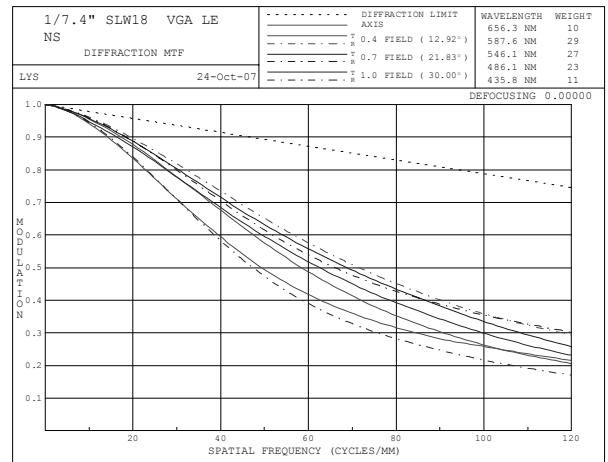
(a) Conventional



(b) SLH18



(c) SLW10



(d) SLW18

그림 6. VGA급 Mobile Phone 광학계의 MTF.

표 3. VGA급 Mobile Phone 광학계의 설계 결과표

항목	설계목표	Conventional	SLH18	SLW10	SLW18	
TTL	< 2.60 mm	2.38	2.6	2.54	2.49	
EFL	1.78~2.08 mm	2.078	2.078	2.078	2.078	
BFL	> 1.00 mm	1.00	1.40	1.51	1.30	
Relative Illumination	> 50.0% (at 1.0 Field)	50.1	53.6	55.9	53.3	
F/수	< 3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	
Distortion	Optical	< ±1.0%	0.9	0.6	0.9	0.9
	TV	< ±1.0%	-0.4	-0.2	-0.3	-0.4
Field of view	60~68°	60	60	60	60	
MTF (at 120 lp/mm)	0.0 F	>30% R/T	48.6	34.8	21.6	27.3
	0.4 F	>30% R/T	48.9/44.7	36.8/25.3	29.5/20.6	34.3/28.1
	0.7 F	>30% R/T	30.6/40.6	27.1/19.8	30.2/25.7	25.5/25.5
	1.0 F	>30% R/T	42.2/31.3	11.6/15.4	17.8/21.7	18.3/16.9
Composition	2 Elements	2 Plastics	1GRIN 1Plastic	1GRIN 1Plastic	1GRIN 1Plastic	
Sensor size			1/7.4" Pixel: 3 μm (φ 2.4 mm)			
quadratic constant at λ <sub>0</sub> (A)		-	0.190	0.373	0.118	

지는 가상의 radial GRIN 렌즈를 정의하였고, 이를 사용하여 1GRIN 1P 광학계를 설계하였다. 그림 7에는 가상의 radial GRIN 렌즈에 대한 굴절률 분포가 나타나 있고, 표 4에는 설계에 사용된 가상의 radial GRIN 소재의 특성이 정리되어 있다. 가상의 GRIN 소재는 기존의 SELFOC 소재인 SLH18과 굴절률은 같고, 굴절률 구배는 SLW10보다 더 큰 것이 특징이다.

4.2 광학계 설계 및 평가

설계목표사항은 앞서 설계된 광학계와 동일하다. 그림 8은 유한 광선 수차도로서 가상의 GRIN 소재를 사용했을 경우 종구면 수차와 비점수차가 잘 보정되어 있는 것을 보여주고 있다. 그림 9는 설계된 광학계에 대한 MTF를 보여주고 있

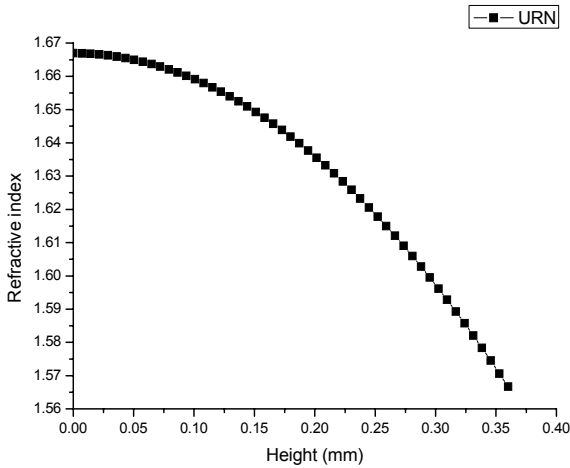


그림 7. 가상의 radial GRIN 렌즈의 굴절률 분포.

표 4. 가상의 radial GRIN 소재의 특성

Type	굴절률 범위 ( $n_d$ )	$\Delta n_d$	$A$
URN	1.6670 ~ 1.5667	0.1003	0.906

표 5. Mobile Phone 광학계의 설계 결과표

항목		설계목표	Conventional	URN
TTL		< 2.600 mm	2.380	2.600
EFL		1.779~2.078 mm	2.078	2.078
BFL		> 1.000 mm		1.460
Relative Illumination		> 50% (at 1.0 Field)	50.1	53.7
F/수		< 3.0	3.0	3.0
Distortion	Optical	< $\pm 1.0\%$	0.9	1.0
	TV	< $\pm 1.0\%$	-0.4	0.2
Field of view		60~68°	60	60
MTF (at 120 lp/mm)	0.0 F	>30% R / T	48.6	74.3
	0.4 F	>30% R / T	48.9/44.7	66.9/67.3
	0.7 F	>30% R / T	30.6/40.6	55.0/56.6
	1.0 F	>30% R / T	42.2/31.3	49.0/37.1
Composition		2 Elements	2 Plastics	1 GRIN 1 Plastic
Sensor size			1/7.4" Pixel: 3 $\mu\text{m}$ ( $\phi$ 2.4 mm)	
quadratic constant at $\lambda_0(A)$			-	0.906

다. 각 필드 내에서 MTF가 30%를 넘어 설계목표를 만족하고 있다. 표 5는 광학계의 설계 결과를 표로 나타낸 것이다.

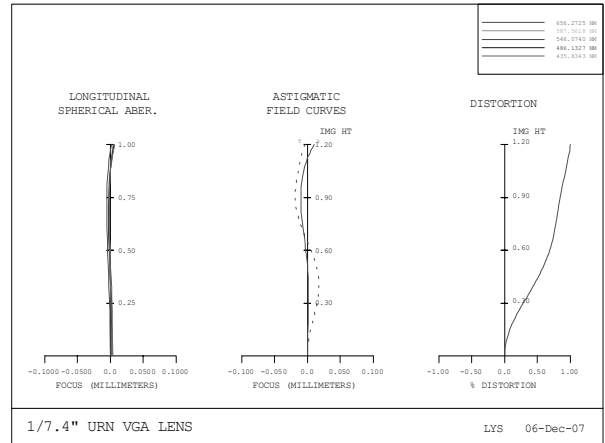


그림 8. 가상의 GRIN 렌즈를 이용한 VGA급 Mobile Phone 광학계의 유한 광선 수차도.

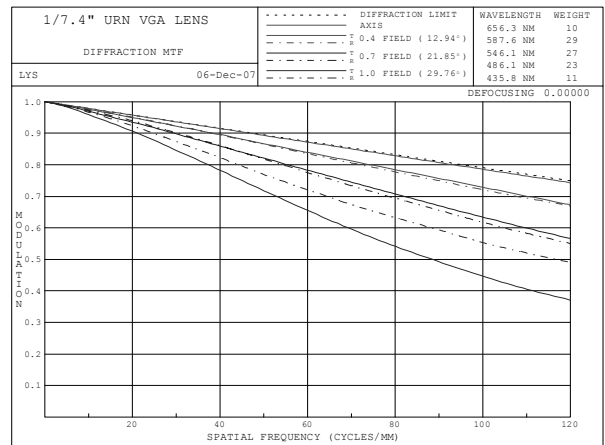


그림 9. 가상의 GRIN 렌즈를 이용한 VGA급 Mobile Phone 광학계의 MTF.

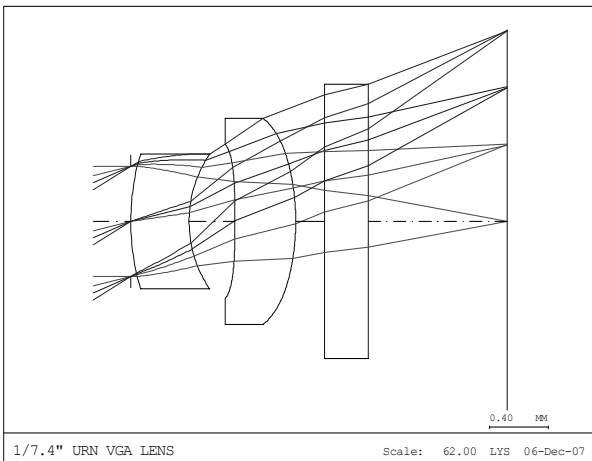


그림 10. 가상의 GRIN 렌즈를 이용한 VGA급 Mobile Phone 광학계의 단면도.

이상의 결과로 본다면 굴절률 구배가 큰 가상의 GRIN 소재를 사용한 설계에서는 기존 2P 비구면 렌즈에 준하거나 보다 우수한 결상특성을 보여줄 수 있다.

그림 10은 가상의 GRIN 소재를 사용하여 설계한 광학계의 형태를 보여주고 있으며, GRIN 소재의 형상은 앞의 설계에 매우 유사하며, 2번 플라스틱 비구면 렌즈의 모양은 통상적인 2P 비구면 광학계의 경우와 유사하다. 이것은 굴절률 구배를 증가 시켜 줌으로서 구면 GRIN 렌즈가 플라스틱 비구면 렌즈와 유사한 수준의 결상 성능을 내고 있음을 보여주고 있는 것으로 해석할 수 있다.

### V. 결 론

본 연구에서는 radial GRIN 소재를 사용하여 2매 구성의 VGA급 mobile phone 광학계를 설계하였다.

Code-V를 사용하여 광학계를 설계하였으며, 먼저 기존에 사용되는 형태인 2장의 플라스틱 렌즈와 필터의 역할을 하는 유리 1장으로 광학계를 설계하고, GRIN 소재를 사용하여 설계한 경우와 특성을 비교하였다. Radial GRIN 소재를 사용한 설계에서는 1번 렌즈에 구면 radial GRIN 렌즈를 사용하였고, 2번 렌즈에는 기존과 같이 플라스틱 비구면 렌즈가 사용되었다. F/수는 3.0, 전장은 2.6 mm 이하, optical distortion  $\pm 1.0\%$  이내, TV distortion  $\pm 1.0\%$  이내로 구현하는 것을 목표로 하였다.

GRIN 소재로는 NSG사에서 시판되고 있는 SELFOC 소재 중에서 굴절률 구배가 큰 SLH18, SLW10, SLW18과 이보다 굴절률 구배가 더 큰 가상의 GRIN 소재를 사용하였다. 시판되는 SELFOC 소재를 사용한 설계에서는 굴절률 구배가 큰 소재를 사용한 경우에 더 좋은 결과를 얻을 수 있었으며, 단색수차는 통상의 2P 비구면 광학계와 유사한 수준으로 보정할 수 있었으나, 색수차의 보정이 미흡하였다. 이에 따라 시

판되는 SELFOC 소재를 사용한 설계는 통상적인 2P 비구면 광학계보다 결상 성능이 떨어진다.

이 문제의 보완을 위해서 SELFOC 소재보다 굴절률 구배가 큰 가상의 radial GRIN 소재를 사용하여 설계하였으며, 가상의 radial GRIN 소재를 사용한 광학계가 SELFOC 소재를 사용한 경우보다 좋은 성능과 수차 특성을 얻을 수 있었다. 현재 시판되는 SELFOC 소재 중에서 SLW10이 굴절률 차이가 0.0378로 가장 크며, 가상의 GRIN 소재의 굴절률 차는 0.1003으로 설정되었다. 따라서 현재보다 3배 정도 굴절률 구배가 큰 GRIN 소재가 개발된다면, 구면 GRIN 렌즈가 비구면 렌즈를 충분히 대체할 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- [1] 이춘곤, 남병덕, “디지털 카메라의 기술현황”, *광학과 기술*, 제2권 제1호, pp. 62-70, 1998.
- [2] Duncan T. Moore, *HandBook of optics II* (McGraw-Hill Inc., United States of America, 1995), Chap. 9.
- [3] P. J. Sands, “Third-order Aberrations of Inhomogeneous Lenses,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol 60, no 1, pp. 1-7, 1970.
- [4] Leland G. Atkinson, Susan N. Houde-Walter, Duncan T. Moore, Danette P. Ryan, and Joan M. Stagaman, “Design of a gradient-index photographic objective,” *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 6, pp. 993-998, 1982.
- [5] J. Brian Caldwell and Duncan T. Moore, “Design of gradient-index lens systems for disc format cameras,” *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 18, pp. 3351-3355, 1986.
- [6] K. Siva Rama Krishna and Anurag Shama, “Chromatic aberrations of radial gradient-index lenses. II. Selfoc lenses,” *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 7, pp. 1037-1040, 1996.
- [7] Code-V Reference Manual, Optical Research Associates. Vol. 1, Chap. 5.
- [8] Erich W. Marchand, *Gradient Index Optics* (Academic Press, New York, 1978).
- [9] Duncan T. Moore, “Gradient-index optics: a review,” *Appl. Opt.*, vol. 19, no 7, pp. 1035-1038, 1980.
- [10] Daniel Malacara, Zacarias Malacara, *Handbook of lens design* (Marcel Dekker Inc, 1994).
- [11] 정호섭, “New Horizon for Slim Camera Module,” *한국 광기술의 현황과 전망*, 한국광학회 광기술분과, 청주대학교 대천수련원, 제16회 광기술 워크샵 논문집, pp. 120-124, 2006.
- [12] 김동식, “비구면 유리렌즈를 이용한 초소형 휴대폰용 렌즈모듈 개발”, *한국 광기술의 현황과 전망*, 한국광학회 광기술분과, 청주대학교 대천수련원, 제 16 회 광기술 워크샵 논문집, pp. 125-142, 2006.
- [13] 윤용규, “슬림형 모바일 폰 카메라용 광학계 설계 및 평가”, *한국 광기술의 현황과 전망*, 한국광학회 광기술분과, 청주대학교 대천수련원, 제16회 광기술 워크샵 논문집, pp. 143-172, 2006.

## Optical System Design Composed of Spherical SELFOC Lens and Aspherical Plastic Lens for Mobile Phone Camera

Yong-Sun Lee and Jong-Ung Lee<sup>†</sup>

*Department of Laser and Optical Information Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: julee@cju.ac.kr*

(Received January 16, 2008, Revised manuscript March 6, 2008)

We designed optical systems for a mobile phone camera using a spherical SELFOC lens and an aspherical plastic lens. Since the radial index distribution gives an additional design parameter for optical design, an aspheric lens could be replaced by a spherical lens. The imaging performances of the design were compared with conventional 2P design composed of two aspherical plastic lenses. In the first stage of study, we designed 1GRIN 1P lenses by using commercially available SELFOC materials. But, the conventional 2P lenses had better performance than the 1GRIN 1P lenses. In the 1GRIN 1P designs, the performance depends on index variation of GRIN material, the larger variation gives the better performance. Hence, we tried to design by using fictitious GRIN materials which have large index variation. We found if the index variation could be increased to about 3 times that of currently available SELFOC materials, the 1GRIN 1P lens will have equivalent or better performance than the conventional 2P design.

OCIS code: 110.2760, 080.3620, 110.0110.