

## 마이크로 광학계의 설계에서 비구면 렌즈의 조합 효과

김명중\*(울산대 대학원), 김한섭(울산대 대학원), 박규열(울산대 기계·자동차공학부),  
전종업(울산대 기계·자동차공학부), 김의중(주엔투에이)

### Effect of Combination with Aspherical Lens in the Micro Optical System Design

M. J. Kim (Mechanical Eng. Dept., UOU), H. S. Kim (Mechanical Eng. Dept., UOU), E. J. Kim (N2A Co., Ltd)  
K. Y. Park (Mechanical&Automotive Eng. Dept., UOU), J. U. Jeon (Mechanical&Automotive Eng. Dept., UOU)

#### ABSTRACT

In the design of optical system, important variables of optical system (including indices, shapes, spaces, stops, etc.) must manipulate in order to balance out offensive aberration. In this paper, it carried out a basic study on the design of micro optical system usable for the acquaintance of visual information in the particular conditions such as capsule type endoscopes. In this study, specification for design of optical system selected voluntarily and the basic design of optical system carried out by using the ray tracing method on the assumption that ideal lenses without aberrations. In the designed optical system, the optimization including aberration correction and the performance evaluation of optical system carried out by using the CODE-V. The final designed optical system consists of seven sheets of lenses. Also the results of performance evaluation, the micro optical system combined with aspherical lenses was confirmed to have improved optical performance as compared with the micro optical system consisted of spherical lenses.

**Key Words :** 마이크로 광학계(Micro optical system), 근축 광학(Paraxial optics), 비구면 렌즈(Aspherical lens), 광선추적작도법(Ray tracing method), 수차(Aberrations), 최적화(Optimization)

#### 1. 서론

산업의 발전과 더불어 광학관련 산업은 점점 전문적이고 기술 집약적인, 부가가치가 높은 미래지향적 첨단산업으로 진입하기 위하여 다양한 연구가 수행되고 있다. 또한, 캡슐형 내시경과 같은 특수한 환경 하에서 영상정보를 획득하기 위한 목적으로 사용되는 초소형, 고성능의 마이크로 광학계의 필요성이 요구되고 있다. 마이크로 광학계를 설계함에 있어 제조상의 어려움과 광학적인 제한 요소에 의해 많은 어려움이 따른다. 제조의 편의성 때문에 대다수의 광학계는 구면렌즈로 국한하여 설계·제작되고 있으나, 구면을 포함한 어떤 광학계에서도 모든 수차가 정확히 0 이 될 수 없으며, 단지 얼마나 0 에 접근하였는지의 여부로 광학계의 성능을 평가하는 것으로 알려져 있다. 상의 결상에 영향을 끼치는 수차<sup>[1]</sup>의 균형을 맞추기 위하여 광학계의 변수인 렌즈의 배수를 포함하여 굴절률, 렌즈의 형상,

간격 및 조리개 등을 조정하거나, 비구면 렌즈<sup>[2]</sup> 또는 굴절률구배 렌즈<sup>[3]</sup>와 같은 특수한 렌즈를 조합하여 설계를 한다.

본 연구에서는 마이크로 광학계를 설계함에 있어서 광선추적작도법을 이용하여 초기설계를 한 후, 광학 설계용 소프트웨어인 CODE-V 를 이용하여 수차보정을 포함하는 최적화와 광학계의 성능평가를 수행하였다. 최적화의 과정에서 한 면이 비구면의 형상을<sup>[4]</sup> 가진 1 개의 비구면 렌즈를 조합하여 그 효과를 확인했다.

#### 2. 광학계의 설계

##### 2.1 광학계의 설계 사양

본 연구에서, 광학계의 설계 사양은 내장 기관의 영상정보를 획득하기 위하여 사용되는 캡슐형 내시경에 장착되는 마이크로 광학계를 대상으로 하여 임의의 광학적 요구 사양을 설정 하였다.

파장범위 : 390 nm ~ 780 nm (가시광선 영역)  
 물체각 : 140°  
 물체거리 : 20 mm ~ 40 mm  
 전장 : 8 mm  
 직경 : 5 mm  
 CCD Size : 1/7 Inch ( $\approx 3.629$  mm)

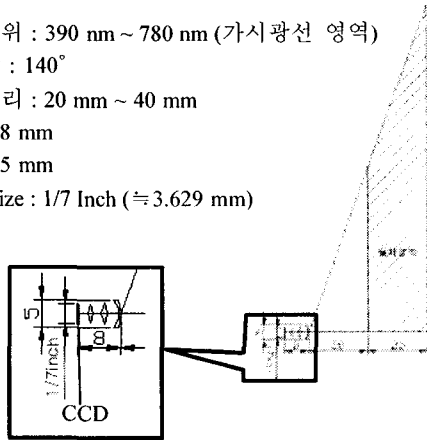


Fig. 1 Specification for design of optical system

Fig. 1 은 광학계의 설계 사양을 나타내고 있다. 가시광선의 영역에서 광학계로부터 20~40 mm 떨어진 물체를 물체각 140° 로 하여, 전장 8 mm, 직경 5 mm 인 광학계에서 1/7 Inch 의 크기를 가지는 CCD 에 상을 결상 시킬 수 있도록 설정 하였다.

## 2.2 광학계의 기초 설계

수차가 존재하지 않는 이상적인 광학계에서 3 차원 영역의 물체 점에서 출사한 모든 광선이 상면의 한 점에서 완벽하게 결상 되는 영역을 근축 광학 영역이라 하며<sup>[1]</sup>, 광학계의 초기설계와 설계평가의 과정에서 근축 광학적 접근법을 사용하였다.

광선은 공간에서 복사 에너지가 흐르는 방향으로 그린 직선이며 렌즈 속을 지나는 광선은 렌즈의 두꺼운 부분으로 굴절한다. 실제의 렌즈는 제 1 주요면과 제 2 주요면을 가지는 두꺼운 렌즈이므로 두꺼운 렌즈에서의 광선추적작업으로<sup>[2]</sup> 광학계의 요구되는 설계 사양에 맞게 상을 결상 시킬 수 있도록 각 렌즈의 초점거리와 주요면의 위치, 렌즈간의 거리를 대략적으로 배열을 한 후, 두꺼운 렌즈에서 초점거리와, 각 주요면의 위치를 구하는 식<sup>[4]</sup>을 이용하여 곡률반경  $R$ 을 근사적으로 계산 하였다.

Table 1 Configuration of optical system

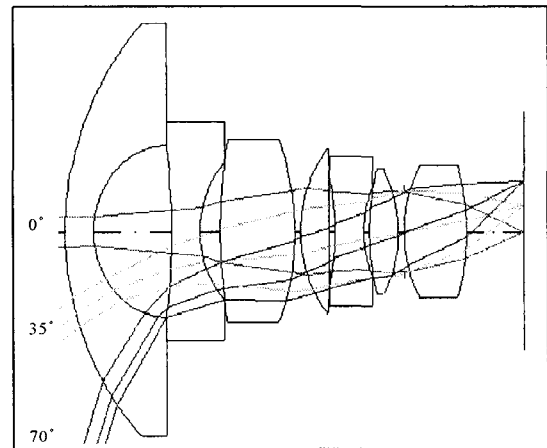
| Surface # | Radius   | Thickness | Refraction index |
|-----------|----------|-----------|------------------|
| Object    | Infinity | 20        |                  |
| 1         | 5.684    | 0.5       | 1.48749          |
| 2         | 2.0326   | 3.5752    |                  |
| 3         | 5.4134   | 0.5       | 1.620410         |
| 4         | -5.0326  | 2.2772    |                  |
| 5         | 1.2067   | 0.5       | 1.755201         |
| 6         | -1.3680  | 0.6352    |                  |
| Image     | Infinity | 0         |                  |

Table 1 은 초기설계에서 구한 렌즈의 곡률, 면간의 거리, 굴절률을 나타낸다.

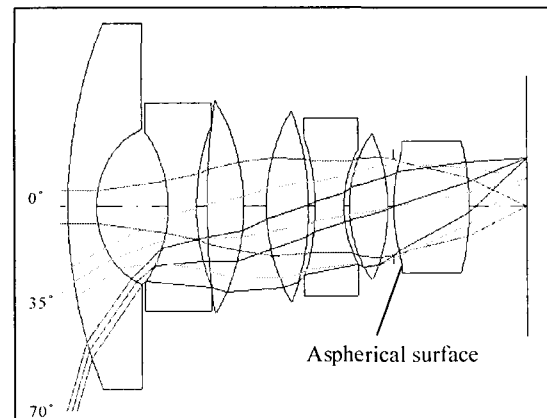
## 2.3 광학계의 최적화

초기설계에서 구한 데이터를 바탕으로 하여 광학설계용 소프트웨어인 CODE-V 를 이용하여 수차보정을 포함하는 광학계의 성능을 향상시키기 위하여 최적화를 수행하였다<sup>[4]</sup>.

입사동의 직경(EPD)은 0.5 mm 로 하였다. 파장( $\lambda$ )은 가시광선의 영역 390 nm~780 nm 에서 색수차를 보정 분석하기 위하여 480 nm, 550 nm, 680 nm 를 선택했으며 550 nm 를 기준파장으로 하고 각 파장에 대한 가중치는 부여하지 않았다. 물체각은 광선수차를 보정 분석하기 위하여 70°, 35°, 0° 의 세각을 사용하였다. 조리개는 주광선(Chief ray)과 광축(Optical axis)이 일치하는 지점에 위치 시켰다<sup>[1]</sup>.

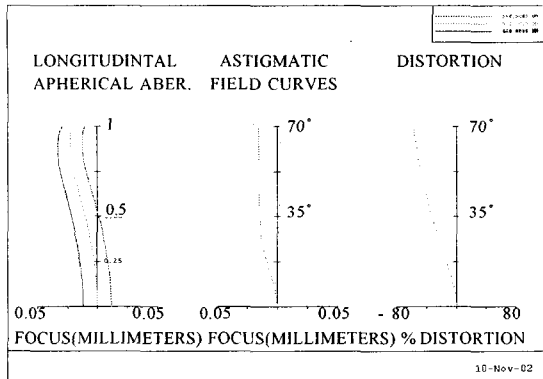


(a) Micro optical system with spherical lens only

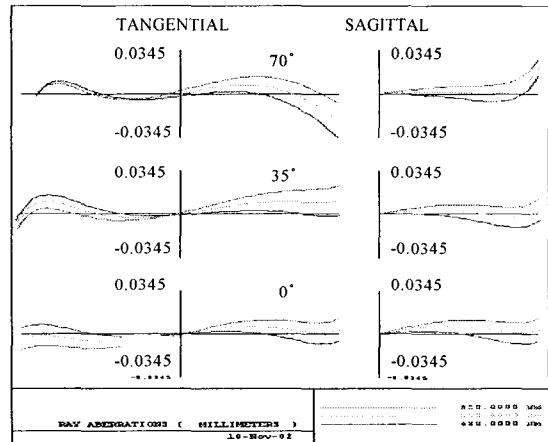


(b) Micro optical system combined with aspherical lens

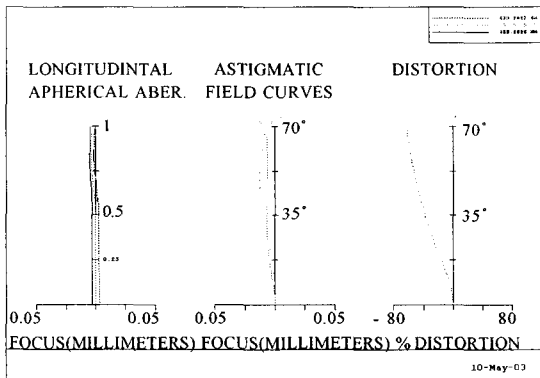
Fig. 2 Schematic view of optical system with same dimension



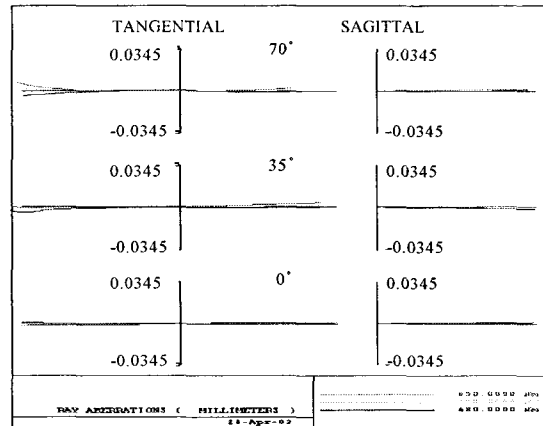
(a) Micro optical system with spherical lens only



(a) Micro optical system with spherical lens only



(b) Micro optical system combined with aspherical lens



(b) Micro optical system combined with aspherical lens

Fig. 3 Field aberration curves

Fig. 4 Ray aberration curves

모든 렌즈의 곡률과 글래스의 종류, 렌즈의 두께, 렌즈 사이의 거리를 변수로 지정한 후, 요구되는 광학계의 설계사양에 부합하는 구속조건으로 구속하여 최적화를 수행하였다.

최적화를 수행하는 과정에서 모든 렌즈를 구면으로 하여 요구되는 설계사양에 만족하도록 렌즈의 매수를 추가 하면서 반복 수행을 하여 설계한 후, 다시 한 번이 비구면 형상을 가진 비구면 렌즈 1 매를 조합하여 최종 설계를 하였다. 조합한 비구면 렌즈에서 비구면 계수는 비구면식<sup>16)</sup>에서 10 차승까지 고려하였다.

Fig. 2 는 구면렌즈로 구성된 광학계와 비구면렌즈와 조합된 광학계의 형상을 나타낸다. 비구면 렌즈가 조합된 광학계의 직경은 5 mm, 구면렌즈로 구성된 광학계의 직경은 6.5 mm 로 나타났으며, 비구면렌즈와의 조합은 동일한 광학계의 전장에서 더 작은 직경을 가지는 광학계를 설계할 수 있었다.

### 3. 광학계의 성능 평가

Fig. 3 은 필드에 따른 종구면 수차와 비점수차, 왜곡수차를 나타낸 필드수차도이다. 비구면 렌즈와 조합된 광학계는 구면렌즈로 구성된 광학계와 비교하여 파장에 따른 종구면수차와 비점수차는 현저히 작게 보정할 수 있었지만, 횡배율이 각도에 따라 변함으로 발생하는 왜곡수차는 광각의 물체각으로 인하여 보정의 한계가 있었다.

Fig. 4 는 입사하는 물체각과 파장에 따른 X, Y 상면에서 주광선으로부터 벗어난 정도를 나타내는 광선 수차도이다. 비구면 렌즈와 조합된 광학계는 구면렌즈로 구성된 광학계와 비교하여 미세한 수차가 존재 하지만, 수차량을 현저히 작게 보정할 수 있었다.

Fig. 5 는 입사하는 물체각에 따른 상면 상에서의 초점크기를 나타낸 것이다. 비구면 렌즈와 조합된 광학계는 구면렌즈로 구성된 광학계와 비교하여 현저하게 작은 초점크기를 가지는 것을 알 수 있다.

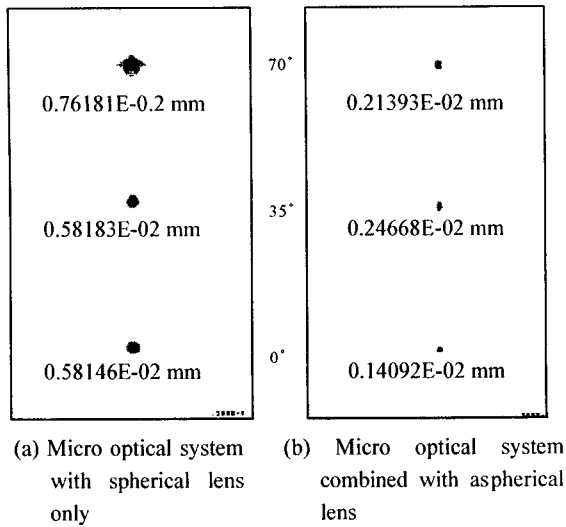
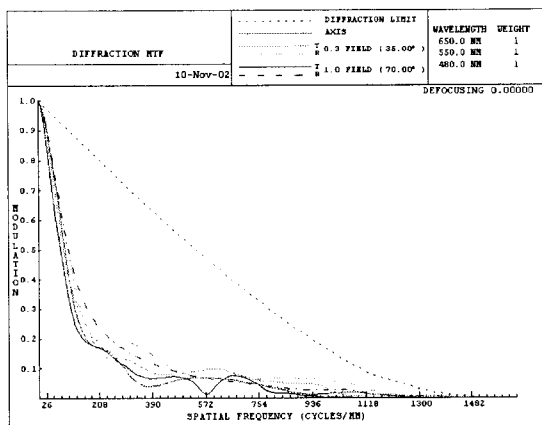
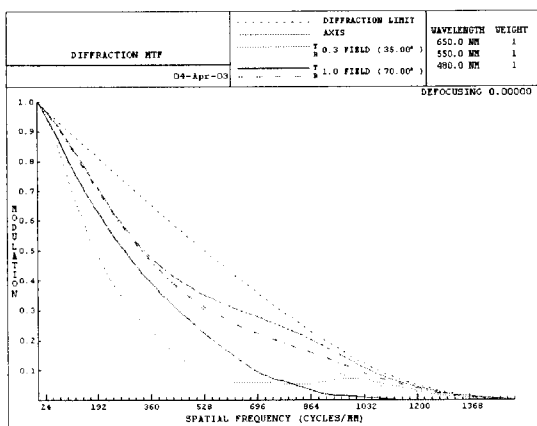


Fig. 5 Spot diagram



(a) Micro optical system with spherical lens only



(b) Micro optical system combined with aspherical lens

Fig. 6 Modulation transfer function

Fig. 6 은 변조전이함수(MTF)로 모든 공간주파수에  
서 영상의 변조도에 대한 물체의 변조도의 비를  
나타낸다. 비구면 렌즈와 조합된 광학계는 구면렌  
즈로 구성된 광학계와 비교하여 한계 주파수점이  
매우 높으며 또한, 제한된 공간주파수 상에서 더  
높은 분해능을 가진다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 특수한 환경 하에서 영상정보를  
획득하기 위한 목적으로 사용되는 마이크로 광학계  
를 설계 및 평가 하였다. 수차의 최소화를 위하여  
광학계의 변수들을 적절하게 조절하고 1 개의 비구  
면 렌즈를 조합 하여 설계를 하면서 다음과 같은  
결론을 얻었다.

1. 광학계의 설계에 있어서 비구면 렌즈의  
조합으로 마이크로 광학계의 초 소형화가  
가능하다.
2. 비구면 렌즈의 조합은 수차보정, 분해능  
등과 같은 광학적인 성능을 향상시킨다.
3. 횡배율이 각도에 따라 변함에 의해 발생  
하는 왜곡수차는 광각의 물체각으로 인하  
여 보정의 한계가 있다.

#### 참고문헌

1. Hecht, Eugene, "Optics," Addison-Wesley Pub. Co.,  
7nd ed., pp 150~155, pp 253~276, 2002.
2. Michael Bass, Joy M. Enoch, Eric Wo Van Stryland,  
William L. Wolfe, "Handbook of optics III: Classical  
Optics," 2nd ed., McGraw-Hill, pp III2-9, 2001.
3. Glassner, A, "Surface Physics for Ray Tracing, in  
Introduction to Ray Tracing," Academic Press, pp 121-  
160, 1989.
4. Morgan, J., "Introduction to Geometrical and  
Physical Optics," McGraw-Hill, pp 57, 1953.
5. 조용주, 이종용, "제한조건이 있는 광학설계의  
최적화기법", 산업과학연구 18 권 1 호, pp 393~400,  
2000.
6. Driscoll, Walter G. Vaughan, William, "Handbook of  
optics: Image Formation: Geometrical and Physical  
Optics," McGraw-Hill, pp 2-12, 1978.
7. Lionel Baker, "Optical Transfer Function :  
Foundation and Theory," SPIE Optical Engineering  
Press, pp 143~153, 1992.