

Triplet Camera 광학계의 설계와 수차 분석

김 종 태

부경대학교 공과대학 사진정보공학과, 부산 608-737

(1998년 7월20일 받음, 1998년 8월25일 최종수정본 받음)

Design and Aberration Analysis of Triplet Camera Optical System

Jong-Tae Kim

Dept. of Photographic Science & Information Technology

Pukyong National University, Pusan 608-737

(Received 20 July 1998, in final form 25 August 1998)

Abstract

Triplet type photographic optical system is designed by using numerical method. Initially the paraxial quantities, numerical solutions are found for the system which is free from the Seidel seven aberrations. The final system has $f/4$ with the half field angle 20° , and the image size is 36mm with the focal length of 50mm.

1. 서 론

3매의 단 렌즈로 이루어져 있는 단순한 triplet은 구성 요소의 수가 최소이면서 전체의 수차를 완전히 제거할 수 있는 가장 실용화된 광학계의 하나이다. 1890년부터 1900년에 걸쳐서 H. D. Taylor는 등가이지만 굴절능(power)이 반대인 분산렌즈 요소로부터 집합적인(collective) 렌즈 요소를 분리하면, 그 조합은 광각(wide)구경의 카메라 대물렌즈로 작용하기에 충분한 굴절능을 가짐을 발견하였다.^{1)·2)} 각 요소의 페츠발(Petzval) 상면 만곡에 관계하는 양이 굴절능에는 의존하나 광학계의 위치와는 무관하므로 한 요소에서 양(+)의 곡률은 다른 요소의 음(-)의 곡률에 의해 보정될 수 있다. 집합적인 요소를 두 부분으로 나누고 그것을 중앙의 분산적 요소의 각 측면에 좌우 배치함으로써 그는 이 새 원리를 유지할 수 있었고, 동시에 모든 다른 수차들을 보정할 수 있는 충분한 설계 변수들을 얻을 수가 있었다.³⁾

그러나 triplet이 폭넓게 사용되게 된 것은 H. D. Taylor가 기존의 광학재료를 사용해서 3매의 렌즈 형태로 완전히 비점수차가 없는 상면의 평탄함이 달성될 수 있음을 나타내면서 시작된다. 그때까지는 비점수차를 없애는 것은 새로운 광학 재료의 개발로 인한 것으로 생각하였다. 고전적인 유리만을 사용해서 triplet으로 비점수차가 없는 상면의 평탄함을 얻을 가능성은 페츠발 합(Petzval sum)을 작게하기 위한 최량의 전제 조건으로서 주광선(principal ray)과 주변광선(marginal ray) 입사고의 비가 작게되는 위치에 triplet의 오목렌즈를 놓을 수 있다는 점에 기초하고 있으며, 다양한 형태로 구성할 수 있다.^{3)·5)}

Triplet 렌즈계는 오늘날의 고급 사진기를 가능케 한 첫 번째의 고성능 카메라 렌즈의 기본구조로서, 등가 굴절능과 같은 굴절률을 갖는 볼록렌즈와 오목렌즈로 구성되어 있으며, 페츠발 합은 제로였다. 그러나 렌즈사이의 거리를 변화시켜 요구하는 굴절능을 얻을 수 있었으나, 횡색수차와 왜곡수차가 존재한다.

본 논문에서는 triplet 렌즈계를 근축 광학의 기초이론으로부터 해석적인 방법으로 초기설계 데이터를 결정하였으며, 그 광학적 성능 및 수차특성을 Seidel 수차론에 의해 분석하였다. 이렇게 설계된 광학계를 유한광선추적을 통하여 최적화 방법으로 고차 잔류수차를 제거하여 보급형 카메라 광학계에 사용할 수 있는 초점거리 50mm, f/4, 화면의 크기 36mm인 렌즈계를 설계하였다.

2. Triplet 렌즈계의 설계 이론

7개의 Seidel 수차를 제거할 수 있는 가장 단순한 광학계가 triplet 광학계이다. Triplet 렌즈계는 설계변수가 8개로서 7개의 Seidel 수차와 임의의 초점거리를 갖는 광학계를 구성하는데 충분하다. 먼저 광학유리의 종류와 렌즈두께를 고정인자로 보고 광학계를 고려해 보자. 왜냐하면 렌즈의 두께는 설계변수로 중요하지 않고, 가공 및 조립시 기구적으로 안정된 형태가 되도록 결정하면 된다. 일반적으로 렌즈의 두께는 렌즈 직경의 5~10% 범위 내에서 선택하며, 광학계의 크기에 의존하므로 가공상이나 렌즈의 굴절능(refracting power)에 좌우된다. 또 광학유리의 선택은 광학계의 수차에 매우 중요한 양으로서 설계시 임의대로 변화시킬 수 없으므로 설계변수에서 제외시켰다. 따라서 광학계에서 렌즈 사이의 거리변수 2개와 3개의 굴절능 그리고 3개의 렌즈의 형상인자(shape factor)로서 모두 8개의 설계변수를 7개의 Seidel 수차와 초점거리로서 결정할 수 있다. 카메라 광학계로서 triplet 렌즈계는 조리개의 크기의 조절이 가능해야 하고, 이 조절이 가능한 조리개 즉, 아이리스(iris)가 광학계의 중심 근처에 존재하여 광학계의 크기를 최소화하도록 설계되어야 한다. 또한 아이리스의 위치는 공간 중에 존재해야 하며, 이것이 조리개(aperture stop) 역할을 하여야하므로 일반적으로 triplet 렌즈계에서는 중심의 오목렌즈의 뒷면에 위치한다. 광학계에 대한 근축 광선의 추적은 다음과 같은 변환식과 굴절식을 기본으로 하고 있다.^{6)·7)}

$$h_i = h_{i-1} - d_{i-1}u_{i-1} \quad (\text{변환식}) \text{-----} (1)$$

$$n_i u_i = n_{i-1} u_{i-1} + h_i k_i \quad (\text{굴절식}) \text{-----} (2)$$

여기서 k_i 는 광학면의 굴절능(refracting power), u_i 는 근축광선이 광축과 이루는 근축각이다. 이 두식을 바탕으로 근축 광선 추적을 통하여 Seidel 수차계수를 계산할 수 있다. 여기서는 계산을 간단히 하기 위하여 처음에는 조리개를 오목렌즈와 일치시켜서 설계변수를 결정한 후 최종적으로 조리개의 위치를 조정하여 잔류수차가 최소가 되도록 한다. 광학계의 형상인자와 무관한 3개의 수차와 초점거리를 광학계가 얇은 렌즈라 가정하여 표시하면 다음과 같다.*)

$$k = k_1 + \frac{h_2}{h_1} k_2 + \frac{h_3}{h_1} k_3 \quad \text{-----} (3)$$

$$p = \frac{k_1}{n_1} + \frac{k_2}{n_2} + \frac{k_3}{n_1} = 0.33k \quad \text{-----} (4)$$

$$C_1 = \frac{h_1^2 k_1}{V_1} + \frac{h_2^2 k_2}{V_2} + \frac{h_3^2 k_3}{V_3} = 0 \quad \text{-----} (5)$$

$$C_2 = h_1 \overline{h_1} \frac{k_1}{V_1} + h_2 \overline{h_2} \frac{k_2}{V_2} + h_3 \overline{h_3} \frac{k_3}{V_3} = 0 \quad \text{-----} (6)$$

$$= h_1 \overline{h_1} \frac{k_1}{V_1} + 0 + h_3 \overline{h_3} \frac{k_3}{V_3} = 0 \quad \text{-----} (6)$$

여기서 $k_i(i=1,2,3)$ 는 각 렌즈면의 굴절능, $h_i(i=1,2,3)$ 는 주변광선의 입사고, $\overline{h_i}(i=1,2,3)$ 는 주광선의 입사고, 그리고 $V_i(i=1,2,3)$ 는 아베수(Abbe's number)이다. 위의 4개의 방정식을 연립하여 풀면 초기 광학계를 결정할 수 있다. 또 p 는 페츠발 합으로서 상면만곡을 나타내는 척도이다. 여기서 0으로 두지 않고 0.33 k 라 가정하였다. 만약 p 가 너무 커지면 렌즈의 굴절능이 커져서 고차수차가 증가하게 된다. 위의 4개의 방정식을 만족하도록 k_1, k_2, k_3, d_1 그리고 d_2 를 결정한다. 여기서 d_1 과 d_2 는 두 렌즈 사이의 공기 간격으로서 하나의 변수는 자유롭게 선택할 수 있다. 따라서 3개의 형상인자를 설계변수로 설정하면 나머지 4개의 수차를 보정변수로 할 수 있다. 만약 볼록렌즈를 사용하면 형상인자에 의존하는 모든 수차 S_1, S_2, S_3, S_5 를 제어할 수 있다. 이 4개의 수차는 모두 렌즈 형태의 2차 함수로 표시되므로 2개의 형상인자에 의해 2개의 수차를 제어할 수 있다. 그러므로 간단하게 S_3 와 S_5 의 보정으로 렌즈 형태를 결정한다. 2개의 형상인자로서 렌즈의 S_1 과 S_2 만의 변화를 알 수 있으며, 일반적으로 S_1 과 S_2 를 동시에 보정할 수는 없지만 S_2 의 수차 형태는 알아볼 수 있다. 이 경우 S_1 은 보정이 불가능 하지만, 원 함수의 해로서 S_1 을 보정할 수 있다. 이와 같이 모든 Seidel 수차가 보정된 triplet을 설계할 수 있다.

이렇게 초기 설계된 광학계의 사양을 <Table 1>에 표시하였으며, 초기 설계된 광학계의 각 렌즈의 Seidel 수차 기여도와 전체 수차량을 <Table 2>에 표시하였다. 표에서 알 수 있듯이 짝수차 수차인 S_1, S_3, S_4 그리고 C_1 은 외부 볼록렌즈인 렌즈 1과 3은 양(+의 수차를 갖고, 내부 오목렌즈인 렌즈 2는 음(-의 수차를 갖고 있다. 또한 S_4 즉, 페츠발 합은 $p=-0.32/H^2$ 이고, 초점

거리를 1.0($k=1.0$)으로 규격화하였다. 왜곡수차와 횡색수차는 렌즈 1에 의한 음(-)의 기여량과 렌즈 3에 의한 양(+)의 기여량이 서로 상쇄되고 있으며, 렌즈 2에 의한 기여도는 매우 작은 양이다. 코마(coma)수차는 렌즈 1과 3에 의한 음(-)의 수차량과 렌즈 2에 의한 양(+)의 수차량이 서로 상쇄되고 있다. 여기서 홀수차 수차인 S_2, S_5, C_2 의 부호는 임의의 값이고 Lagrange 불변량 H에 의존하는 양이다. 지금까지 살펴보았듯이 triplet 렌즈의 해석적인 설계는 가능하지만 매우 복잡하다. Triplet 광학계는 카메라 렌즈 설계의 기본 개념을 이해하는데 매우 중요한 복합 광학계로서 근축 광학 이론에 의해 설계하였으며, 해석적인 방법으로 기초설계에 접근하였다.

Table 1. Initial design data of the triplet camera optical system ($f' = 1$)

Surf. No.	Radius of curvature	Thickness	Materials
1	0.3378		Air
2	Plane	0.0836	LAK9
3	-0.5808	0.0501	Air
4	0.3378	0.0209	SF5
5	Plane	0.1189	Air
6	-0.4120	0.0836	LAK9
Image plane			Air

Table 2. The numerical data gives the lens contributions for the seven Seidel aberrations, and the last line gives the totals for each aberration

	S1 Spherical aberration	S2 Coma	S3 Astigmatism	S4 Petzval sum	S5 Distortion	C1 Logitudinal color	C2 Lateral color
Lens 1	0.004024	-0.001912	0.005668	0.003028	-0.006883	0.000678	-0.000232
Lens 2	-0.007222	0.003526	-0.008518	-0.004713	0.001135	-0.001150	0.000050
Lens 3	0.003344	-0.001055	0.001377	0.002482	0.006441	0.000422	0.000266
Total	0.000146	0.000559	-0.001472	0.000797	0.000693	-0.000050	0.000084

3. 광학계 설계의 최적화와 광선수차 해석

Seidel 수차이론에 의해 구한 초기설계 데이터는 광학계의 기본 레이 아웃의 자료이고, 잔류 수차(residual aberration)로 인하여 화질에 많은 영향을 받게 된다. 따라서 화질을 향상시키기 위해서는 damped least square method에 의해 최적화 과정을 통하여 최대한 잔류 수차를 제거하여 광학계의 성능을 향상시킨다.²⁴⁾ 이렇게 최종 설계된 모든 수차가 보정된 광학계의 형태를 Fig.1에 표시하였으며, 설계 데이터는 <Table 3>에 나타내었다. <Table 3>에 주어진 광학계는 초점거리 50mm, f/4, half field angle 20°인 보급형 카메라 광학계이다. 그리고 Fig.2와 Fig.3에 이 광학계의 유한광선 수차와 상면만곡 수차를 표시하였다. 수차도에서 알 수 있듯이 모든 필드에 대하여 수차가 50 μ m 이내로 보정되어 있음을 알 수 있다.

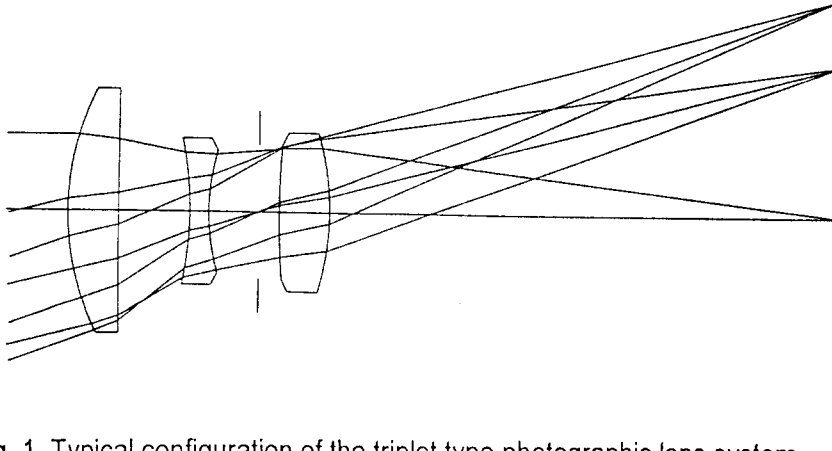


Fig. 1. Typical configuration of the triplet type photographic lens system.

Table 3. The design data of the triplet camera optical system ($f' = 50\text{mm}$)

Surf. No.	Radius of curvature	Thickness	Clear Dia.	Materials
1	22.0668		19.645	Air
2	615.5985	4.12	18.165	LAK9
3	-30.4900	5.67	10.900	Air
4	18.5083	1.50	9.866	SF5
Stop	Plane	4.00	10.037	Air
6	68.8877	1.67	10.747	Air
7	-22.8270	4.12	12.294	LAK9
Image plane		41.344	36.397	Air

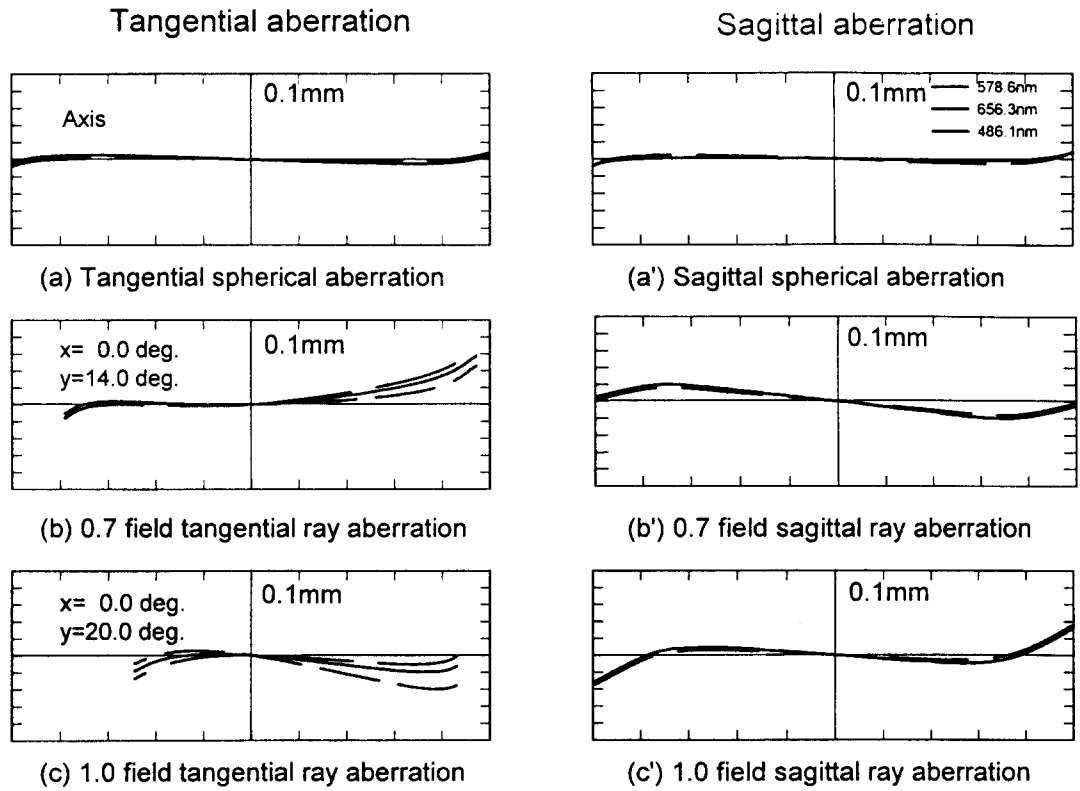


Fig. 2. The transverse ray aberrations for the triplet optical system.

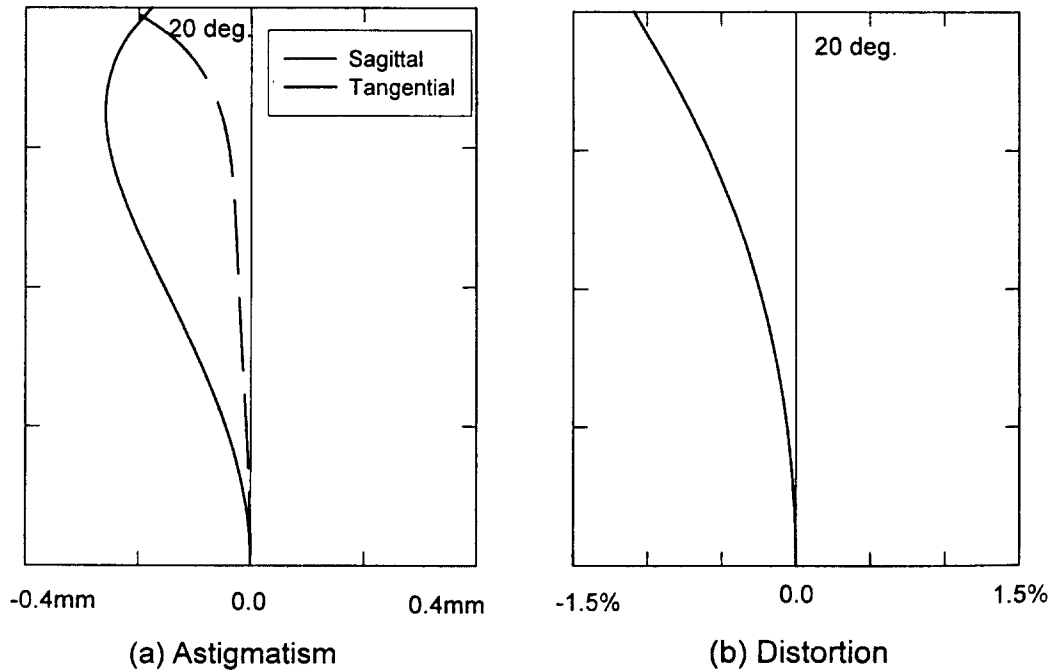


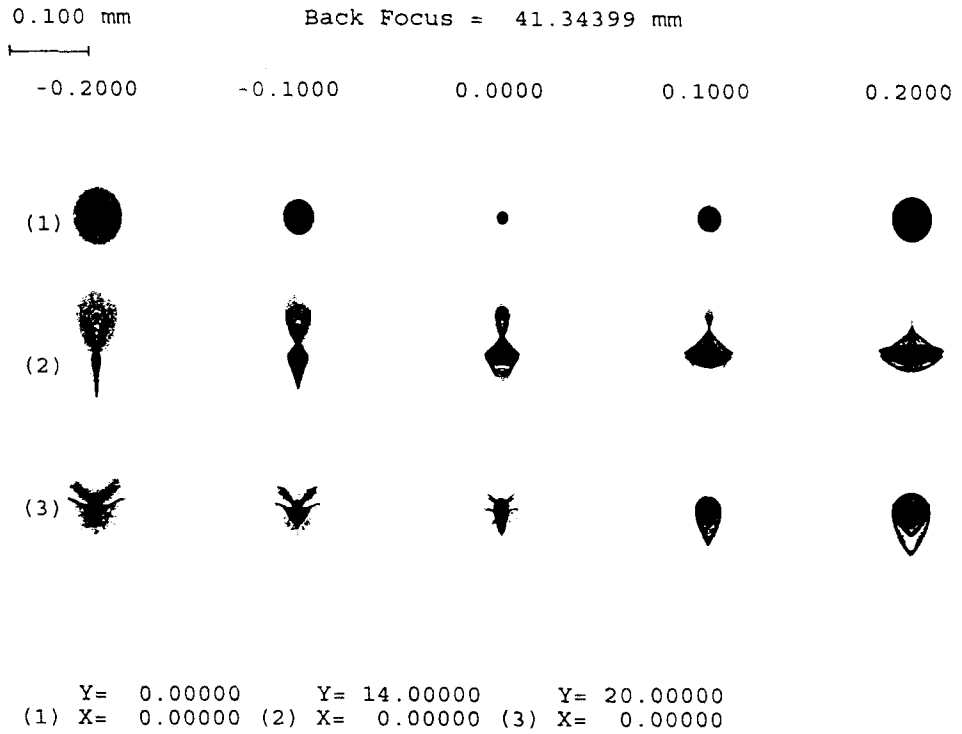
Fig. 3. The field curvature and distortion of the triplet optical system.

Fig.2의 왼쪽 3개의 곡선은 자오면(tangential plane)에서 3개의 파장(C, d, F-line)에 따른 수차도로서 (a)는 축상(axis) 수차를 나타내고 있으며 횡구면수차에 대응되는 양이다. (b)와(c)는 각각 0.7 field(14°) 및 1.0 field(20°)에서의 비축 광선수차를 나타내고 있다. 수차도에서 알 수 있듯이 색수차는 잘 보정되어 있고 화각(field angle)이 증가함에 따라 구경식 효과(vignetting effect)에 의해 입사동의 모든 광선이 상면에 도달하지 못하고 있음을 알 수 있다. Fig.2의 오른쪽 3개의 그림(a'), (b'), (c')는 구결면(sagittal plane) 수차를 3개의 파장에 대하여 비축 물점에 대하여 나타낸 것이다.

Fig.3은 상면수차를 나타낸 것으로서, (a)는 자오면 상면만곡(점선) 수차와 구결면 상면만곡(실선) 수차를 수평축에, 광학계의 반화각(half field angle)을 수직축에 나타내었다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 자오상점 t와 구결상점 s가 일치하는 곳은 상면 끝 근처에 있고, 근축 상점 안에 있음을 알 수 있다. 따라서 광학계의 성능을 향상시키기 위해서는 node쪽으로 상면을 defocus시켜야함을 알 수 있다. Fig.3의 (b)는 왜곡수차를 나타낸 그림으로서 수평축에 수차의

크기를, 수직축에 주광선이 물체 공간에서 광축과 이루는 각도를 나타낸 것으로서 최대 1.1%(선형왜곡 0.1mm) 이내로 잘 보정되어 있음을 수차도로부터 알 수 있다.

광학계의 성능 평가 방법으로서 유한광선 수차분석 이외에도 spot diagram과 MTF(modulation transfer function)곡선 및 through focus MTF을 이용하기도 한다. Fig.4에서는 광학계를 통과한 광선 다발이 상면에 분포하는 척도를 나타내는 spot diagram으로서 Gauss 상면에서 광학계를 전후로 $\pm 0.1\text{mm}$ 씩 defocus시키면서 화질을 측정함으로써 광학계의 공차(tolerance)의 척도가 된다. 또 Fig.5는 광학계의 기하학적 MTF곡선으로 (a)는 축상에 대하여 (b)와 (c)는 비축상에 대한, 자오면에 대한 공간주파수 변화를 나타내고 있다. Fig.5의 (a'), (b') 및 (c')는 구결면에 대한 설계 광학계의 공간 분해능 척도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 축 상에 대해서는 회절한계의 성능을 보이고 있으며, 모든 field에 대하여 카메라 광학계의 분해능 MTF 0.5에서 10 lp/mm 이상을 만족하고 있음을 알 수 있다.



Wavelengths [nm]:

587.60 656.30 486.10

Fig. 4. Spot diagrams of the triplet optical system.

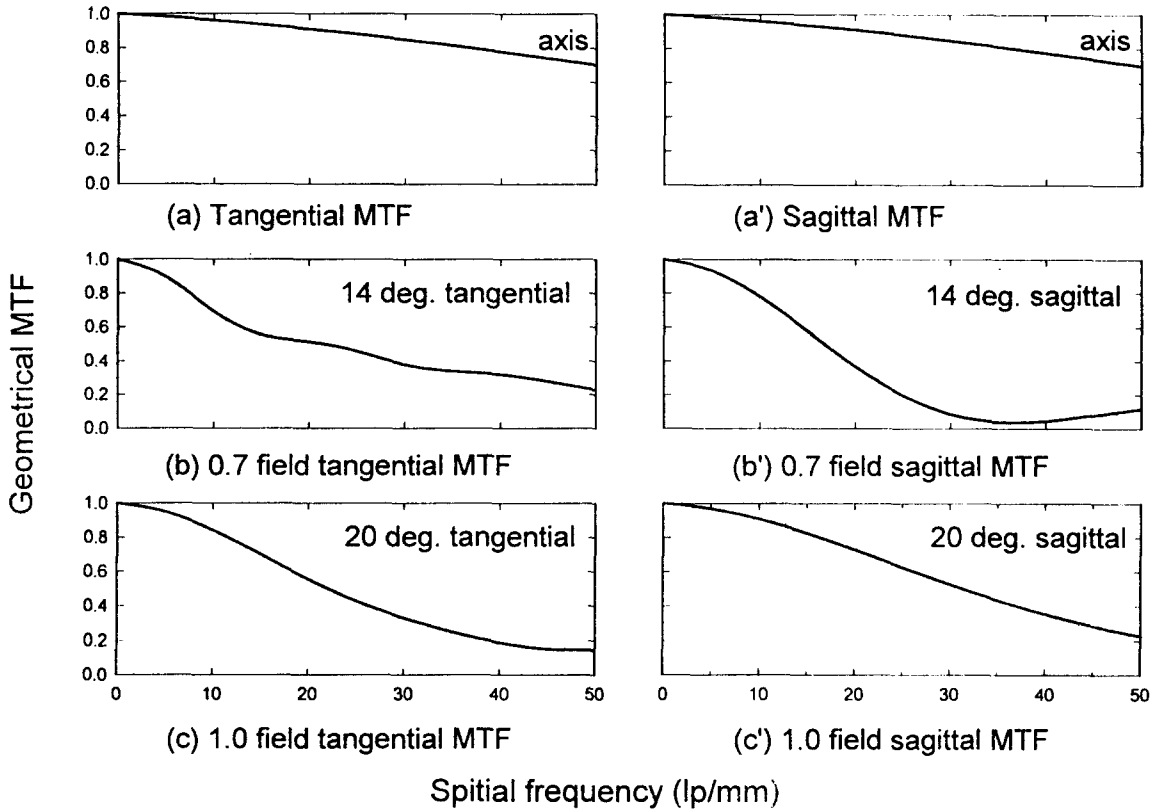


Fig. 5. The modulation transfer function of the triplet optical system.

4. 결론

대표적인 카메라 렌즈 형태 중 하나인 triplet 광학계를 Seidel 수차 이론에 의해 해석적인 방법으로 설계하여 각 설계 변수에 따른 광학적 효과에 대하여 알아보았다. 이렇게 설계된 광학계의 잔류수차를 제거하기 위하여 최적화 기법을 이용하여 보급형 표준렌즈 사양을 만족하도록 모든 수차를 제거하였다. 최종 설계된 광학계는 초점거리 50.0mm, f/4, 화각 40°, 상면크기 (image size) 36mm 범위 내에서 우수한 성능을 나타내었다.

참 고 문 헌

- 1) R. E. Hopkins, JOSA, 52, 389(1962).
- 2) W. J. Smith, Opt. Eng. 35, 819(1996).
- 3) W. J. Smith, "Modern Lens Design", McGraw-Hill, New York(1994).
- 4) S. Zhang and R. R. Shannon, Opt. Eng. 35, 819(1995).
- 5) Hopkins/Hanau, "U.S. Military Handbook for Optical Design", ch. 10, Sinclair Optics(1987).
- 6) P. Mouroulis, J. Macdonald, "Geometrical Optics and Optical Design", ch. 9, Oxford Univ. Press, London(1997).
- 7) 이상수, "기하광학", ch. 3, 교학연구사(1987).
- 8) Kidger Optics, "Introduction to Computer-Aided Optical Design", ch. 7, Kidger Optics Ltd. (1992).
- 9) T. H. Jamieson, Optimization Techniques in Lens Design, Monography of Applied Physics (No. 5), American Elsevier Pub. Co., New York(1971).
- 10) 이종웅, 이상수, 새물리, 27, 8(1987).