

전역구조함수를 사용한 광각 2군 줌 렌즈의 설계

권혁준 · 임천석[†]

한남대학교 광·전자물리학과
Ⓞ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

(2009년 10월 23일 받음, 2009년 11월 9일 수정본 받음, 2009년 11월 16일 게재 확정)

본 논문에서는 다음과 같은 관점의 광각 2군 줌 렌즈 설계를 소개한다. 먼저전역최적화의 개념을 기초설계단계에서 도입하고, 이를 통해 현대의 수많은 데이터들을 체계적으로 계통화하고 단순화할 수 있는 설계방안을 제안한다. 구체적인 방안으로 전역설계를 위해 전역구조함수라는 새로운 개념의 함수를 도입하였고 단순화시켰으며, 나아가 약간의 대수적인 혹은 수치적인 계산을 통해 전역 해 영역을 구하였다. 전역 해 영역은 전역최적화에 대응되는 개념이고 상용화된 설계프로그램들 보다 더 체계적이고 통찰적인 설계방향을 제시한다.

Design of Two-group Zoom Lens System with Wide Angle of View Using Global Structure Function

Hyuk-Joon Kwon and Cheon-Seog Rim[†]

Department of Applied Optics and Electromagnetics, College of Natural Science, Hannam University, 133 Ojeong-dong,
Daedeok-gu, Daejeon 306-791, Korea

[†]E-mail: csrim@hnu.kr

(Received October 23, 2009; Revised manuscript November 9, 2009; Accepted November 16, 2009)

We introduce a new design technique by treating a two-group zoom lens system with a wide angle of view. First, the concept of the global optimization is introduced in the initial design stage, and from this, the global design technique is completed by analyzing and summarizing large quantities of modern design data. That is, we define the global structure function to achieve a new conceptual design technique for global optimization. And the function is put in a simple form by referring lots of patent data, manipulated with other algebraic equations, and solved finally such that we obtain the global solution region. The global solution region corresponds to the global optimization and suggests insightful systematized directions for the design of two-group zoom lens systems. These directions are attractive compared to global optimization.

Keywords: Zoom lens, Wide angle lens, Global optimization, Local optimization, Global synthesis

OCIS codes: (080.2740) Geometric optical design; (080.3620) Lens system design; (080.2468) First-order optics;
(220.2740) Geometric optical design; (220.3620) Lens system design

I. 서 론

1970년대와 같은 과거의 광학설계 환경과 현대의 상황은 무척이나 다른 것 같이 여겨진다. 현대의 광학설계는 막강한 컴퓨팅 파워와 진화에 진화를 거듭한 설계프로그램들^[1-3] 쉽게 사용할 수 있게 됨에 따라, 과거의 창조적이고 도전적인 문제들이 한낱 키보드 상의 숙달과 기능화의 범주로 인식 되곤 한다. 하지만 수십 년 전에 개발되었던 각종 광학설계의 원리와 결과들은 매우 훌륭한 것들로 여전히 현대의 고도

화된 자동설계에서도 근간을 이룬다. 즉, 현대의 계산능력은 과거의 체계적이고 구조화된 설계들을 보강 또는 강화하거나 발전적인 변형을 추구할 뿐, 새로운 형태의 설계를 거의 발견해 내지 못하고 있다.

한편, 현대의 광학설계는 과거에 비해 훨씬 세련되어 지고 정교해 졌으며, 거의 불가능할 것 같이 보였던 계산조차도 훌륭히 수행해 내고 있기도 하다. 그럼, 현대의 광학설계가 추구해야할 방향 혹은 방향 중 하나는 무엇일까? 이는 강력한 컴퓨팅파워로 무장한 지능화된 상업용 프로그램들에서 그 해답을 찾을 수 있을 것이다. 통상의 상업용 프로그램들은 지역적인 최적화를 통해 목표로 하는 데이터를 찾아낼 뿐

[†]E-mail: csrim@hnu.kr

통찰적인 시야를 제시하지는 못한다. 이렇게 생각할 수 있다. 미답지의 광활한 대륙에서 살만한 곳을 어떻게 찾을 것인가? 지도가 있다면 결정적인 단서를 제공해 줄 것이다. 그럼, 지역최적화에서 전역최적화로 확장하고자 할 때 어떻게 지도를 만들 것이냐가 과제이다. 지능화된 상업용 프로그램들에서 거의 자동적으로 가능한 데이터의 전 영역을 탐색해 다양한 데이터들을 제시하는 전역최적화 루틴이 있지만 실제로는 그리 효율적이지도 효과적이지도 못하다.

본 논문에서는 상업용 프로그램을 사용한 지역최적화(local optimization)를 통찰적이고 체계적으로 수행하기 위해 전역최적화 개념을 기초설계단계에 도입한다. 이를 통해 과거의 복잡한 설계원리와 현대의 수많은 데이터들을 일관되고 체계적으로 계통화할 수 있는 가능성을 제시한다.

그러므로 본 논문에서 논의가 전개될 광각 2군 줌 렌즈는 다음 두 가지에 주안점을 두고 설계를 한다. 먼저, 앞에서 언급한 유능한 프로그램들에서 이루고자 하지만 실용성이 모호한, 전역최적화(global optimization 혹은 global synthesis)를 기초설계단계에서 도입하고, 둘째, 현대의 수많은 데이터들을 체계적으로 계통화할 수 있는 단순한 설계방안을 제안한다. 이를 위해 전역구조함수(global structure function)라는 새로운 개념의 함수를 도입하고, 다양한 데이터들을 활용하여 단순화시키고, 그리고 대수학적인 기법과 약간의 수치해석적인 방법을 통해 전역 해 영역을 구한다. 전역 해 영역은 전역최적화에 대응되는 개념이고 상용화된 설계프로그램들보다 더 체계적이고 통찰적인 설계방향임을 확인하였다. 결과적으로 전역 해 영역으로부터 굴절능 배분 또는 줌 궤적과 같은 광학구조적인 데이터를 얻을 수 있었고, 지역최적화를 의미하는 해 영역에 한정해서 집중할 수 있었고 이를 통해 효과적이고 효율적인 설계를 할 수 있었다.

II. 전역구조함수의 정의와 토의

광각의 2군 줌렌즈를 설계하기 위해서는 크게 두 가지 문제를 풀어야 한다. 첫째 줌렌즈 설계^[4-10]에서 필요한 줌 궤적 계산을 해야 하고, 둘째 광각의 2군 렌즈를 가장 효과적으로 표현할 수 있는 구조함수를 정의해야 한다. 줌 궤적 계산은 각 군별 굴절능 배분의 문제와 직결되므로 2군 렌즈의 굴절능에 대한 표현식에서 출발한다.^[11-12] 그림 1을 참조하기 바란다. 그림 1은 광각(wide)조건에서 망원(telephoto)조건으로의 변환을 나타내고 있다. 다음 식 (1)에서 (7)까지에 걸쳐 그림 1과 관련된 식들은 첨자 w 혹은 t로 표시된다.

$$K_w = k_1 + k_2 - d_{1w}k_1k_2 \tag{1}$$

$$K_t = k_1 + k_2 - d_{1t}k_1k_2 \tag{2}$$

$$Z_r = \frac{K_w}{K_t} = \frac{efl_t}{efl_w} \tag{3}$$

$$d_{2w} = bfl_w = \frac{1 - d_{1w}k_1}{K_w} \tag{4}$$

$$d_{2t} = bfl_t = \frac{1 - d_{1t}k_1}{K_t} \tag{5}$$

$$D_w = d_{1w} + d_{2w} \tag{6}$$

$$D_t = d_{1t} + d_{2t} \tag{7}$$

여기서, k_1 과 k_2 는 각 군별 굴절능을 의미하고, K_w 와 K_t 는 렌즈간격 d_w 와 d_t 에서의 총 굴절능을 의미한다. Z_r 는 통상 줌 비(zoom ratio)라고 명명되며 다르게 표현하면 최대 유효 초점거리와 최소 유효초점거리의 비로 나타낼 수 있다. 그리고 w와 t 첨자는 wide와 tele를 의미하며, efl는 effective focal length, bfl는 back focal length를 의미한다.

전역구조함수란 앞의 서론에서도 언급한 것처럼, 특정한 렌즈 시스템의 특징을 가장 잘 기술할 수 있는 함수를 말한다. 즉, 최적화 루틴에서의 평가함수(merit function)나 제한 조건(constraints)에 대응되는 함수라고 생각할 수 있다. 차이점은 특정한 렌즈 시스템의 가능한 수치해 영역을 최대한 단순하게 그리고 가장 효과적으로 파악하기 위해 최소한의 특징(혹은 구조)함수로 구성한다는 것이다. 여기서 특징함수는 광학구조를 의미하는데, 렌즈, 프리즘, 반사경, 회절격자와 같은 소자종류, 굴절능 배분비, 소자간 거리, 양과 음의 렌즈 배치, 조리개 위치, 대칭성 또는 대칭성의 파괴정도, 수차 밸런싱 기법을 모두 포함하는 수학적으로 표현된 대수식(algebraic equations)이라 할 수 있다. 그럼, 광각 2군 렌즈의 전역구조함수를 도출하기 위해 전형적인 광각 2군 렌즈의

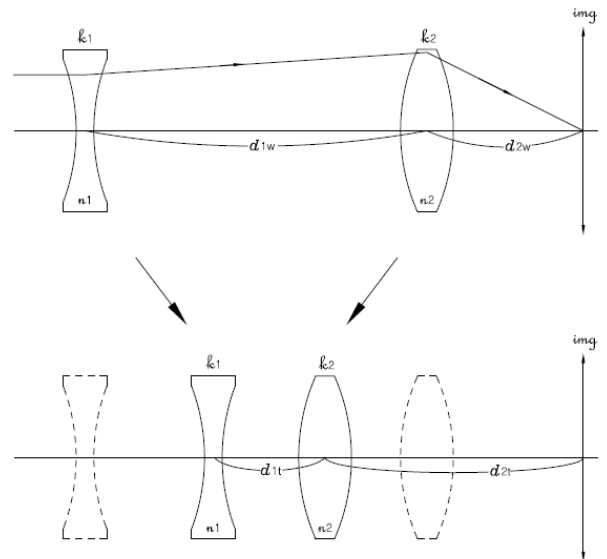


FIG. 1. Schematic diagram of wide angle 2-group zoom lens.

수차 및 1차 광학량들을 살펴보자. 그림 2와 그림 3에 서로 다른 유형의 광각 2군 렌즈를 제시한다. 그림 2와 그림 3의 특징적인 차이점은 첫 번째 군(1군)과 두 번째 군(2군)의 사이에 여유 공간이 있느냐 혹은 없느냐에 있다. 그림 2 혹은 유형 1에 대한 광학특성데이터들은 표 1과 표 2에 나타나 있고, 그림 3 혹은 유형 2에 대한 광학특성데이터들은 표 3과 표 4에 나타나 있다.

표 1에서부터 표 4까지의 데이터를 활용하여, 광각 2군 렌즈의 특징에 대해 비교분석 해 보자. 먼저, 1군과 2군 간의 초점거리 혹은 굴절능의 차이를 살펴보면 유형 1의 경우는 약 13 % 정도 차이가 나고, 유형 2의 경우는 약 24 % 정도 차이가 난다. 즉, 약 20 % 전후의 굴절능 차이가 남을 알 수 있다. 원하는 줌 비가 3배 혹은 300 %라면 식 (1)과 식 (2)로부터 알 수 있듯이 굴절능의 가변은 세 번째 항($d_1k_1k_2$)의 군

간 거리 d_1 에 의해 주로 만들어 지게 된다. 왜냐하면 광각 렌즈는 표 1과 표 3에서 보는 바와 같이 1군은 음의 굴절능을 2군은 양의 굴절능을 갖기 때문이다. 그러므로 군 간의 거리 d_1 이 어느 정도 확보된 유형 1이 줌 렌즈용으로는 적합하다 하겠다.

다음으로 표 2와 표 4에 나타난 자이텔 3차 수차를 살펴보자. 계산은 ORA 사의 CODE V로 수행되었음을 밝힌다. 먼저 유형 2의 렌즈를 살펴보면, 왜곡수차를 제외한 모든 수차들이 1군과 2군 간에 상호 소거되도록 설계되었음을 알 수 있다. 하지만 유형 1의 경우는 1군과 2군 간의 3차 수차적인 소거 대칭성이 페츠발 합(Petzval Sum 혹은 PS)을 제외하고는 상당히 파괴되어 있음을 알 수 있다. 유형 1과 유형 2는 시야각(Field Of View 혹은 FOV)에서 상당히 큰 차이가 있는데, 각각 164°와 108°로 제시되어 있다. 즉, 광각으로 가면

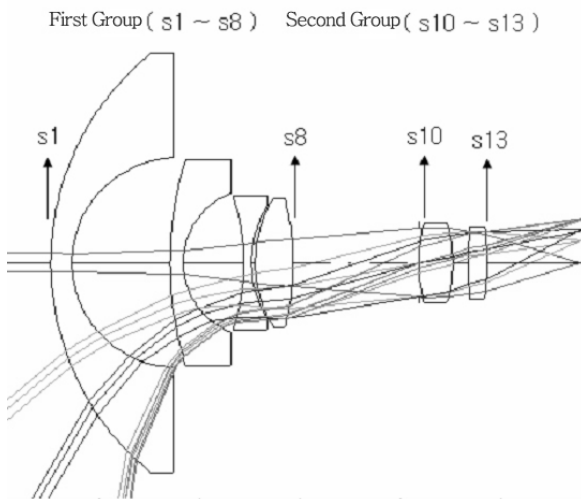


FIG. 2. Wide angle 2-group zoom lens (Type 1).

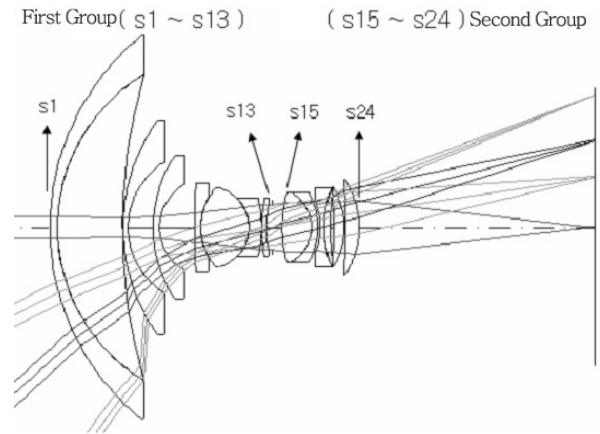


FIG. 3. Wide angle 2-group zoom lens (Type 2).

TABLE 1. The data of optical characteristics for wide angle 2-group zoom lens of type 1

| Items | Data (unit: mm) | |
|------------------------------|------------------------------|-------------|
| | Effective focal length (efl) | First group |
| Second group | | 12.14 |
| Lens system | | 4.00 |
| F-number | 1.79 | |
| Field of view | 164° | |
| Thickness | s1 ~ s8 | 29.22 |
| | s8 ~ s10 | 15.13 |
| | s10 ~ s13 | 8.23 |
| | s13 ~ si | 11.63 |
| | s1 ~ si | 64.21 |
| Back focal length (bfl) | 11.63 | |
| Refractive indices of lenses | 1st | 1.6204 |
| | 2nd | 1.6204 |
| | 3rd | 1.6204 |
| | 4th | 1.7495 |
| | 5th | 1.4875 |
| | 6th | 1.7885 |

TABLE 2. Seidel 3rd order aberrations for wide angle 2-group zoom lens of type 1. SA(Spherical Aberration), TCO(Tangential Coma), TAS(Tangential Astigmatism), SAS(Sagittal Astigmatism), DST(Distortion), AX(Axial Color), LAT(Lateral Color), PTZ(Petzval Sum). G1(Group 1), G2(Group 2)

| Abbe. Surf. | SA | TCO | TAS | SAS | DST | AX | LAT | PTZ |
|----------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|----------|----------|----------|
| 1 | -0.00002 | -0.00577 | -1.92178 | -1.51490 | -160.26775 | -0.00134 | -0.14150 | -0.01158 |
| 2 | 0.00105 | -0.10025 | 6.58771 | 4.46015 | -141.98088 | 0.00449 | -0.14276 | 0.03000 |
| 3 | -0.00032 | -0.04470 | -3.12401 | -1.71866 | -81.05906 | -0.00341 | -0.16103 | -0.00897 |
| 4 | 0.02076 | -0.74031 | 13.55567 | 7.68943 | -91.39714 | 0.01417 | -0.16844 | 0.04201 |
| 5 | -0.00012 | -0.04504 | -4.16458 | -0.29004 | -37.42480 | -0.00186 | -0.24006 | 0.01455 |
| 6 | 0.18844 | -3.54262 | 25.48266 | 10.68238 | -66.94284 | 0.03629 | -0.22742 | 0.02899 |
| 7 | -0.19928 | 3.47957 | -23.49298 | -9.99137 | 58.15357 | -0.07799 | 0.45393 | -0.02862 |
| 8 | 0.00003 | -0.01922 | 2.44219 | -0.23828 | 49.84149 | -0.00282 | 0.58911 | -0.01394 |
| sto | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 10 | -0.06357 | -1.21441 | -9.76861 | -4.61273 | -29.37549 | -0.03220 | -0.20504 | -0.01797 |
| 11 | -0.11394 | 1.43702 | -8.07618 | -4.04858 | 17.02071 | -0.03704 | 0.15572 | -0.01797 |
| 12 | 0.000956 | -0.12951 | 4.61901 | 0.71639 | -32.38268 | 0.00826 | -0.37331 | -0.01091 |
| 13 | -0.17928 | 1.69486 | -6.57576 | -3.01520 | 9.50147 | -0.06315 | 0.19900 | -0.01091 |
| G1 | 0.01055 | -1.01834 | 15.36487 | 9.07873 | -471.07739 | -0.03247 | -0.03817 | 0.05242 |
| G2 | -0.35583 | 1.78796 | -19.80152 | -10.96011 | -35.235987 | -0.12413 | -0.22363 | -0.05775 |
| SUM (G1+G2) | -0.34528 | 0.76962 | -4.43665 | -1.88138 | -506.31337 | -0.15660 | -0.26180 | -0.00533 |

TABLE 3. The data of optical characteristics for wide angle 2-group zoom lens of type 2

| Items | Data (unit: mm) | |
|---------------------------------|-----------------|--------|
| Effective focal length (efl) | First group | -3.66 |
| | Second group | 4.81 |
| | Lens system | 4.00 |
| F-number | 4.50 | |
| Field of view | 108° | |
| Thickness | s1 ~ s13 | 8.45 |
| | s13 ~ s15 | 0.61 |
| | s15 ~ s24 | 3.02 |
| | s24 ~ si | 9.22 |
| | s1 ~ si | 21.30 |
| Back focal length (bfl) | 9.22 | |
| Refractive indices of lenses | 1st | 1.7847 |
| | 2nd | 1.6968 |
| | 3rd | 1.6968 |
| | 4th | 1.6968 |
| | 5th | 1.8045 |
| | 6th | 1.5807 |
| | 7th | 1.5891 |
| | 8th | 1.6968 |
| | 9th | 1.6259 |
| | 10th | 1.6228 |
| | 11th | 1.8052 |
| | 12th | 1.6204 |
| | 13th | 1.5173 |
| | 14th | 1.5173 |

TABLE 4. Seidel 3rd order aberrations for wide angle 2-group zoom lens of type 2. SA(Spherical Aberration), TCO(Tangential Coma), TAS(Tangential Astigmatism), SAS(Sagittal Astigmatism), DST(Distortion), AX(Axial Color), LAT(Lateral Color), PTZ(Petzval Sum). G1(Group 1), G2(Group 2)

| Abbe. Surf. | SA | TCO | TAS | SAS | DST | AX | LAT | PTZ |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | -0.00005 | -0.00194 | -0.10319 | -0.08518 | -1.18632 | -0.00994 | -0.06952 | -0.04524 |
| 2 | 10.00001 | 0.00007 | 0.00737 | 0.00725 | 0.02032 | 0.00468 | 0.01314 | 0.0427 |
| 3 | 0.00000 | -0.00004 | -0.05837 | 0.00193 | 4.97334 | 0.00003 | 0.06355 | 0.01905 |
| 4 | -0.00000 | -0.00036 | -0.10680 | -0.09910 | -3.20988 | -0.00149 | -0.04828 | -0.05658 |
| 5 | 0.00233 | -0.00034 | 0.22709 | 0.22708 | -0.01091 | 0.00644 | -0.00031 | 0.13487 |
| 6 | -0.00103 | -0.01998 | -0.26397 | -0.17810 | -1.14848 | -0.00502 | -0.03237 | -0.08028 |
| 7 | 0.02835 | -0.11859 | 0.52015 | 0.40992 | -0.57156 | 0.01462 | -0.02039 | 0.21074 |
| 8 | -0.00475 | -0.07242 | -0.38891 | -0.14334 | -0.72905 | -0.01340 | -0.06818 | -0.01221 |
| 9 | 0.02926 | -0.02689 | 0.06402 | 0.05853 | -0.01793 | 0.00668 | -0.00205 | 0.03314 |
| 10 | 0.00103 | -0.00566 | 0.01328 | 0.00635 | -0.01166 | -0.02817 | 0.05176 | 0.00171 |
| 11 | 0.00027 | -0.00792 | -0.03598 | -0.08791 | 0.86465 | -0.00546 | 0.05371 | -0.06764 |
| 12 | -0.01217 | -0.12148 | -0.49897 | -0.22940 | -0.76358 | -0.01765 | -0.05873 | -0.05620 |
| 13 | 0.04138 | 0.27336 | 0.74394 | 0.34260 | 0.75450 | 0.02652 | 0.05841 | 0.08430 |
| sto | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 15 | -0.04927 | -0.35053 | -0.96446 | -0.41032 | -0.97301 | -0.04538 | -0.10762 | -0.07914 |
| 16 | -0.00394 | -0.00088 | -0.00192 | -0.00188 | -0.00014 | -0.05445 | -0.00405 | -0.00110 |
| 17 | 0.23622 | 0.26869 | -0.32669 | -0.25877 | 0.09811 | -0.04668 | 0.01770 | -0.13353 |
| 18 | 0.26116 | -0.24995 | 0.35328 | 0.30012 | -0.09575 | 0.12491 | -0.03985 | 0.16248 |
| 19 | 0.02095 | 0.14909 | 0.38119 | 0.14537 | 0.34490 | 0.07443 | 0.17659 | 0.01631 |
| 20 | 0.02979 | 0.33897 | 1.34319 | 0.48612 | 1.84374 | 0.02030 | 0.07701 | 0.03421 |
| 21 | -0.00181 | -0.05203 | -0.44737 | -0.11535 | -1.10418 | -0.00499 | -0.04778 | 0.03009 |
| 22 | -0.02162 | 0.04413 | -0.21699 | -0.19698 | 0.13402 | -0.02034 | 0.01384 | -0.11105 |
| 23 | -0.00002 | -0.00199 | -0.07002 | -0.01636 | -0.66339 | -0.00107 | -0.04324 | 0.00622 |
| 24 | -0.10039 | -0.04481 | -0.17327 | -0.16883 | -0.02512 | -0.02869 | -0.00427 | -0.09896 |
| G1 | 0.08462 | -0.10217 | 0.11967 | 0.23062 | -1.03655 | -0.01720 | -0.05927 | 0.16993 |
| G2 | -0.10137 | 0.10070 | -0.12308 | -0.23687 | -0.44081 | 0.01804 | 0.03834 | -0.17449 |
| SUM (G1+G2) | -0.1674 | -0.00147 | -0.00341 | -0.00626 | -1.47736 | -0.00083 | -0.02093 | -0.00456 |

갈수록 고차수차의 영향에 의해 3차 수차적인 소거 대칭성이 상당히 파괴되어 간단하다고 생각할 수 있다. 그러면 유형 1과 유형 2에서 수차적인 공통점은 무엇일까? 상술한 바와 같이 페츠발 합은 공통적으로 상당히 작은 값을 가짐을 포착할 수 있다. 소숫점 3째 자리에서 반올림해서 보면 페츠발 합은 유형 1과 유형 2에서 공통적으로 약 -0.005 정도로 제로에 가까운 정도의 작은 값을 가진다. 그렇다면 전역구조함수로서 가장 유력한 대수식은 페츠발 합에 대한 표현식임을 알 수 있고, 이에 착안하여 다양한 광각 2군 렌즈에 대해서

페츠발 합을 조사할 필요성을 느낀다. 다음 표 5는 다양한 광각 2군 렌즈에 대한 페츠발 합을 정리한 것이다.

표 5에서 보는 바와 같이, 페츠발 합의 대수식을 전역구조함수로 정의하는데는 큰 무리가 없어 보인다. 다음 식 (8)은 2군 렌즈의 페츠발 합(PS)에 대한 표현식이다.^[11]

$$PS = -\left(\frac{k_1}{n_1} + \frac{k_2}{n_2}\right) \tag{8}$$

TABLE 5. Petzval sum for various kinds of wide angle 2-group zoom lenses

| Data | Patent numbers | PS (Petzval Sum) |
|------|-----------------------|------------------|
| 1 | U.S Patent 4155629 | -0.002753 |
| 2 | U.S Patent 4400066 | -0.001166 |
| 3 | U.S Patent 4540249 | -0.003041 |
| 4 | U.S Patent 4540249 | -0.004411 |
| 5 | U.S Patent 4540249 | -0.003250 |
| 6 | U.S Patent 4838666 | -0.001702 |
| 7 | U.S Patent 5339195 | 0.000704 |
| 8 | U.S Patent 5485314 | -0.002632 |
| 9 | U.S Patent 5546232 | -0.002235 |
| 10 | U.S Patent 6025961 | 0.006963 |
| 11 | U.S Patent 6078435 | -0.000074 |
| 12 | U.S Patent 6169635 | -0.003071 |
| 13 | U.S Patent 6229655 | -0.016658 |
| 14 | U.S Patent 6532114 | -0.012346 |
| 15 | U.S Patent 6762887 | -0.004115 |
| 16 | U.S Patent 6809882 | -0.010757 |
| 17 | U.S Patent 7061688 | 0.000241 |
| 18 | U.S Patent 7061688 | -0.002097 |
| 19 | U.S Patent 7085068 | -0.009260 |
| 20 | Japan Patent 58_32683 | -0.024686 |

여기서, n_1 과 n_2 는 1군과 2군의 렌즈의 굴절률을 의미한다. 그러면 1군과 2군 렌즈의 굴절률을 어떻게 정의 할 것인가가 문제인데 각 군별 구성렌즈의 굴절률 평균을 취하는 것이 좋겠다. 즉, 예를 들면, 1군을 구성하는 렌즈들의 굴절률 값의 평균을 취해 1군의 굴절률 값으로 정하는 것이다. 한 걸음 더 나아가 광선이 렌즈를 통과할 때 각 면에서 느끼는 굴절률은 상대적인 굴절률 혹은 굴절률 차이므로 렌즈와 렌즈 사이도 공기렌즈로 간주하고 평균값을 취하데 기하평균 (geometrical mean value)을 취하는 것이 좋겠다. 여기서, 기하평균을 취하는 이유는 산술평균에 비해 기하평균 쪽이 상대적으로 아주 크거나 또는 아주 작은 특정 굴절률의 값에 덜 좌우되며 전체적으로 완만한 평균값을 산출해 주기 때문이다. 그러므로 식 (8)은 다음과 같이 표현된다.

$$PS = -\left(\frac{k_1}{n_1} + \frac{k_2}{n_2}\right) \quad (9)$$

여기서, \bar{n}_1 과 \bar{n}_2 는 기하평균을 취한 1군과 2군의 굴절률 값이다. 유형 1에서 기하평균을 취한 \bar{n}_1 과 \bar{n}_2 값은 각각 1.332, 1.386이다. 이를 가지고 식 (9)을 사용해서 유형 1의 페츠발 합을 계산해 보면 -0.00573으로 CODE V로 계산된 표 2의 정확한 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 여기서 밝히고자 하는 바는 값의 일치보다는 같은 차수의 값을 가진다는

점과 평균을 취하는 방식이 타당하다는 것이다. 구역구조함수로 정의된 식 (8)을 적절히 정리하면 다음과 같이 된다.

$$k_2 = -\frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} k_1 - \bar{n}_2 PS \approx -k_1 \pm \Delta = -\gamma k_1 \quad (10)$$

$$\gamma = -\frac{k_2}{k_1} = -\frac{f_1'}{f_2'} \quad (11)$$

여기서, $\bar{n}_1 \approx \bar{n}_2$ 근사를 하였다. $\pm \Delta$ 는 PS의 부호에 따라 k_1 의 굴절능에 양 혹은 음의 값이 가감될 수 있음을 의미한다. γ 는 구조변수(structure parameter)라 명하고 1 근처의 값을 가진다. 결과적으로 광각 2군 렌즈의 전역구조함수는 $k_2 = -\gamma k_1$ 과 같이 간단한 형태로 표현할 수 있고 이를 활용하면, 다음 절에서 논의 되겠지만, 전역최적화에 대응되는 전역 해 영역을 얻을 수 있다.

III. 전역구조함수를 사용한 광각 2군 줌렌즈의 사전설계

광각의 2군 줌 렌즈를 사전설계하기 위해 II절의 식 (10)에서 정의된 전역구조함수를 사용한다. 식 (10)로부터 광각 2군 렌즈의 굴절능은 다음과 같이 표현된다.

$$K = k_1 + k_2 - d_1 k_1 k_2 = (1-\gamma)k_1 + d_1 \gamma k_1^2 \quad (12)$$

식 (4), (5), (6), (7)로부터 군 간의 거리 d_1 는 다음과 같이 정리된다.

$$d_1 = \frac{DK - 1}{K - k_1} \quad (13)$$

식 (12)과 식 (13)을 사용해서 k_1 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$(\gamma DK - 1)k_1^2 + (2K - \gamma K)k_1 - K^2 = 0 \quad (14)$$

$$k_1 = \frac{-K(2-\gamma) \pm K\sqrt{(2-\gamma)^2 + 4(\gamma DK - 1)}}{2(\gamma DK - 1)} \quad (15)$$

먼저 k_1 값에 대한 통찰을 얻기 위해 식 (14)에서 $\gamma = 1$ 혹은 $k_2 = -k_1$ 인 경우를 살펴보자. 식 (15)은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$k_1 = \frac{-K \pm K\sqrt{4DK - 3}}{2(DK - 1)} = \frac{-K - K\sqrt{4DK - 3}}{2(DK - 1)} \quad (16)$$

식 (16)에서 다음 두 가지의 조건, 즉, 실근조건($4DK - 3 > 0$)

과 광각렌즈조건($k_1 < 0$)으로부터 분모에서 $DK > 1$ 인 조건을 얻을 수 있고, 이로부터 \pm 해 중 $-$ 의해만 취하게 된다. 수치적인 예를 가지고 구체적으로 좀 더 살펴보자. II절에서 논의된 유형 1의 경우 유효초점거리가 4 mm이므로, 만약 줌비가 3배라면 가변되는 초점거리는 12 mm까지 가변되어진다. 그러면 식 (16)로부터 k_1 값을 얻기 위해 DK 값을 결정하자. 식 (16)에서 DK 가 1에 가까이 가면 갈수록 분모의 영향으로 인해 k_1 값은 비정상적으로 커지므로 DK 는 1보다 큰 값, 즉, 2 혹은 3 정도의 값이 되어야 함을 알 수 있다. DK 가 2일 때의 k_1 값은 -0.134836 이고 DK 가 3일 때의 k_1 값은 -0.083333 이므로, 유형 1의 광학구조와 비교하기 위해 DK 는 3보다 약간 큰 값을 취한다. 왜냐하면 DK 가 3.33 정도일 때 k_1 값이 -0.075260 이 되고 대응되는 초점거리는 -13.3 mm가 되기 때문이다. 표 1의 유형 1에서 1군의 초점거리는 -13.58 임을 참조하기 바란다.

정리하면 식 (1) - 식 (7)과 식 (16)을 사용하여 $K_t = 1/12$, $D_t = 40$ 혹은 $D_t K_t = 40/12 = 3.33$ 일 때 광각의 2군 줌렌즈는 단순 수치계산으로부터 아래와 같이 주어진다(단위: mm).

$$k_1 = -0.075260 \text{ 혹은 } f_1' = -13.3 \tag{17}$$

$$k_2 = 0.075260 \text{ 혹은 } f_2' = 13.3 \tag{18}$$

$$D_t = d_{1t} + d_{2t} = 14.71 + 25.29 = 40.00 \tag{19}$$

$$D_w = d_{1w} + d_{2w} = 44.14 + 17.29 = 61.43 \tag{20}$$

유형 1의 실제 렌즈와 비교해 보기 위해, CODE V를 사용하여 유형 1의 1군(N_1, N_1')과 2군(N_2, N_2') 간의 절점간격을 계산한다. N_1' 과 N_2 간의 절점거리 $\overline{N_1'N_2} = 40.60$ 으로 $d_{1w} = 44.14$ 와 거의 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 유형 1의 실제렌즈에서 렌즈의 전체길이, 즉, 첫 면에서부터 상면까지의 거리가 64.20일 때, 전역구조함수로 계산된 전체길이 D_w 도 61.43 이므로 전역구조함수는 실제렌즈의 상황을 잘 표현하고 있다고 확인할 수 있다.

지금까지의 논의를 바탕으로 하면, 구조변수 γ 가 1이 아닐 때의 식 (15)은 다음과 같이 정리될 수 있고 부가적인 구속조건들도 역시 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$k_1 = \frac{-K(2-\gamma) - K\sqrt{(2-\gamma)^2 + 4(\gamma DK - 1)}}{2(\gamma DK - 1)} \tag{21}$$

$$DK > \frac{1}{\gamma} \tag{22}$$

$$D \geq \frac{(4-\gamma)}{4K} \tag{23}$$

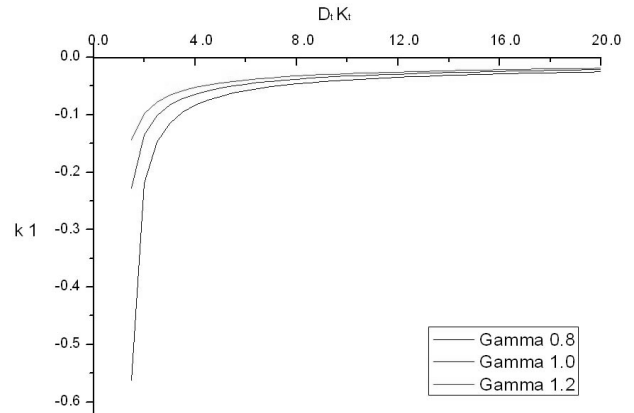


FIG. 4. Global solution region according to structure parameter of γ .

전역해 영역을 살펴보기 위해 엑셀을 사용하여 식 (21), (22), (23) 을 수치해석하면 다음 그림 4를 얻을 수 있다. 그림 4는 구조변수 γ 가 0.8, 1.0, 1.2, 즉, k_1 과 k_2 의 차이가 -20% , 0% , $+20\%$ 일 때의 상황인데, 매우 통찰적인 설계 방향을 제시하고 있다. 참고로 유형 1에서 k_1 과 k_2 의 굴절능 차이는 약 13% 정도이다. 그림 4를 살펴보면, 대략 $D_t K_t$ 가 6인 점을 기준으로 $D_t K_t$ 의 값이 크게 증가해도 1군의 굴절능 k_1 의 값은 거의 변화가 없다. 이는 렌즈 시스템의 총 굴절능 K_t 가 고정되어 있을 때, k_1 값에는 거의 변화가 없으면서 시스템 전체길이 D_t 값만 매우 커지게 된다는 것을 의미하므로 $D_t K_t$ 의 범위는 3보다는 크고 6보다는 작은 정도가 적절함을 알 수 있다. 사실 작은 k_1 값은 수차적으로 월등히 유리하기 때문에 각 군의 굴절능 k_1 과 k_2 는 가급적 작은 값을 선택하도록 해야 한다. 그런 관점에서 본다면 $3 < D_t K_t < 6$ 정도가 적절한 해 영역임을 알 수 있다. 여기서 $D_t K_t$ 범위의 중간 값은 4.5 임에 유의하기 바란다. 즉, 적절한 해가 $D_t K_t = 4.5$ 를 기준으로 분포함을 의미한다. 그러므로 결론적으로 얘기한다면, 그림 4는 무척 단순해 보이지만 앞으로 수행해야 할 최적화에 대해서는 어떤 정보보다 체계적이고 통찰적인 시야를 제공하고 있다는 것이다.

IV. 광각 2군 줌렌즈의 최적설계

본 절에서는 앞서 논의되었던 전역구조함수에 의한 통찰적인 결과를 토대로 지역최적화를 수행하고 그 결과에 대해서 토론한다. 다음 표 6은 목표로 하는 광각의 2군 줌렌즈의 설계사양이다.

최적설계는 CODE V를 사용하여 수행하였고 초기입력 데이터는 유형 1의 렌즈를 사용하였다. 설계사양을 만족시키기 위해 비구면과 렌즈가 추가 되었다. 유형 1에서는 1군에 4매, 2군에 2매 총 6매의 구면렌즈로만 구성되어졌지만, 최적 설계된 데이터는 1군과 2군에 각각 5매씩, 총 10 매의 렌즈로 구성되어진다. 그리고 비구면도 추가되어 지는데, 1군의 네 번째 렌즈와 2군의 두 번째 및 다섯 번째 렌즈가 비구면 렌

TABLE 6. The design characteristics for wide angle 2-group zoom lens

| Items | Optical characteristics | Design specifications |
|-------|-------------------------------|---|
| 1 | Zoom ration | 3 x |
| 2 | Effective focal length | 4 mm (wide), 12 mm (telephoto) |
| 3 | F-number | 1.3 (wide), 3.9 (telephoto) |
| 4 | Field of view | 100 ° (wide) |
| 5 | Overall length of lens system | 72.70 mm (wide), 54.41 mm (telephoto) |
| 6 | Modulation transfer function | More than 100 cycles/mm at MTF 0.45 for wide, middle and telephoto angle. |

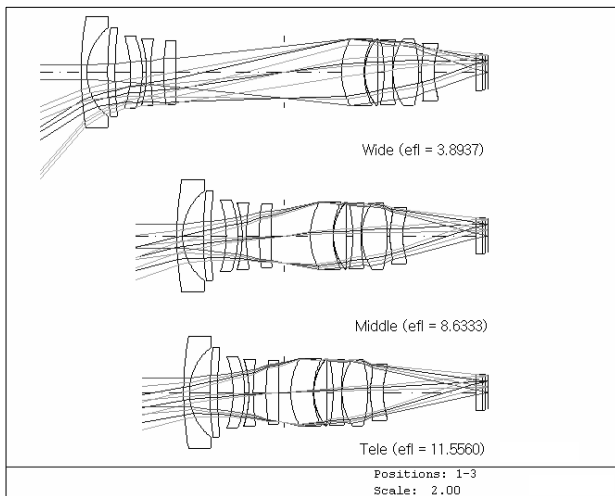


FIG. 5. Wide angle 2-group zoom lens optimized by using CODE V.

즈이다. 다음 그림 5를 참조하기 바란다.

설계된 줌렌즈의 광학구조와 성능을 분석해 보자. 먼저, 구조변수 γ 값과 $D_i K_i$ 값에 대해 살펴본다. 1군과 2군의 유효 초점거리는 각각 -11.66 mm, 13.78 mm 이므로 구조변수 γ 는 식 (11)에 의해 0.85로 주어진다. 앞서도 언급했듯이 이 값은 통상의 광각 2군 렌즈가 갖는 특성 값이고, 페츠발 합의 최소화와 관련되어 있는 중요한 값이다. 한편, 망원조건 (telephoto)에서 렌즈 시스템의 전체길이와 유효초점거리는 각각 54.4 mm, 11.56 mm이므로 $D_i K_i$ 값은 4.7로 주어진다. 이 값은 적절한 해가 $D_i K_i = 4.5$ 를 중심으로 $3 < D_i K_i < 6$ 범위 내에서 주어짐을 예측하였는데, 잘 일치하고 있다. 마지막으로 광학성능을 나타내는 변조전달함수(MTF)가 그림 6에서 그림 8에 걸쳐 제시되어 있다. 각각의 그림은 광각조건, 중간조건, 망원조건 순으로 나타나 있다. 그림에는 없지만 광각조건일 때 왜곡수차 값이 가장 크게 나타나는데, 통상의 광각 렌즈에서처럼 -30.8 %로 상당히 큰 값을 가진다. 하지만 총체적인 광학성능인 변조전달함수는 광각조건에서 보다 오히려 중간조건에서 더 나쁘게 나타남에 유의하라. 왜냐하면, 이는 주로 사용하는 환경이 광각 혹은 망원조건이므로 최적화 시에 광각과 망원조건에 가중치를 더 두었기 때문

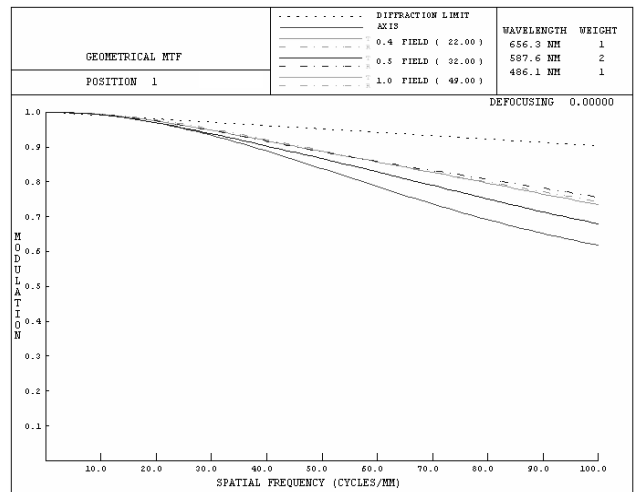


FIG. 6. The characteristics of modulation transfer function for wide angle 2-group zoom lens at the condition of wide angle.

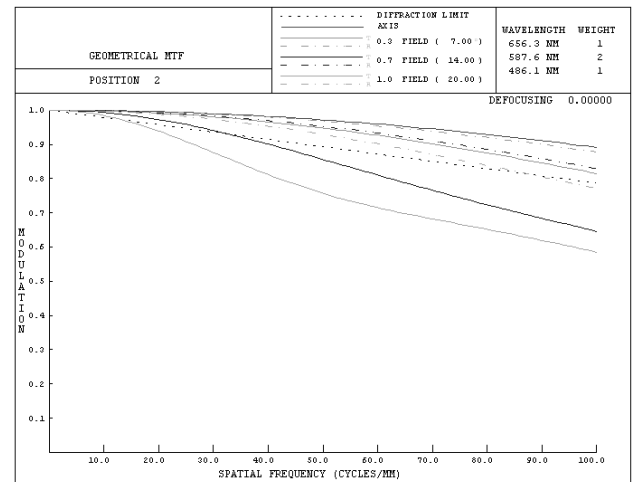


FIG. 7. The characteristics of modulation transfer function for wide angle 2-group zoom lens at the condition of middle angle.

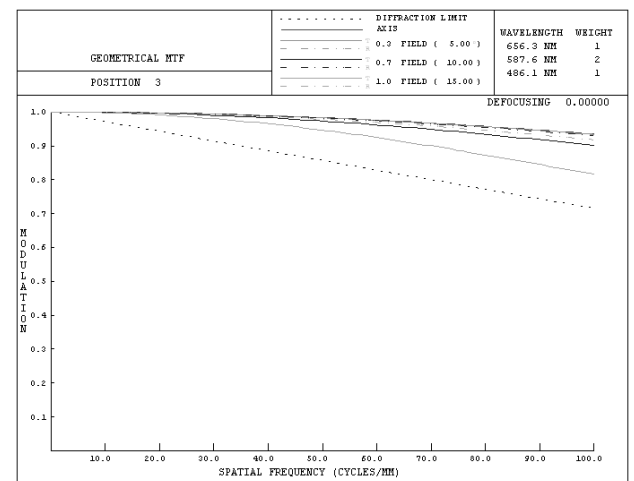


FIG. 8. The characteristics of modulation transfer function for wide angle 2-group zoom lens at the condition of telephoto angle.

이다. 어찌되었든 간에, 결과적인 변조전달함수는 모든 조건에서 상당히 좋은 결과를 보여준다. 즉, 변조전달함수(MTF) 값이 0.45에서 공간주파수는 100 cycles/mm 이상을 나타낸다.

V. 결 론

본 논문에서는 전역구조함수를 도입하였고 기존에 알려진 다양한 데이터들을 활용하여 이를 단순화시켰으며 약간의 대수학적인 혹은 수치해석적인 방법을 통하여 전역 해 영역을 구하였다. 이렇게 얻은 전역 해 영역은 광학구조적인 통찰을 제공했을 뿐만 아니라 목표로 하는 설계영역에 계산능력을 집중토록 하여 효과적이고 효율적인 설계를 가능하게 하였다.

현대의 설계에서 자이델 3차 수차식을 직접 풀거나 또는 광선추적을 통해 수치계산을 하는 복잡다단한 기법은 노력만큼 그 효용성을 평가받기 힘들다. 그리고 줌 렌즈설계에서 많이 활용되고 있는 가우스 괄호법을 통한 1차 광학량들의 복잡한 연립방정식도 통찰적인 설계정보를 주지 못한다. 본 논문에서는 통찰적인 정보를 제공하면서도 복잡하지 않은 과정으로 수많은 데이터들을 체계화시킬 수 있는 방안을 전역구조함수라는 이름으로 제시하였다. 논문의 내용은 광각의 2군 줌렌즈에 대한 것이지만 다양한 유형의 렌즈 시스템 또는 다양한 그룹의 줌렌즈에도 적용이 가능할 것으로 제안한다. 핵심은 먼저 어떤 유형의 렌즈 시스템인가를 판단하고 이를 구조적으로 가장 잘 표현해 낼 수 있는 전역구조함수를 찾는 것이다. 여기서 구조라 함은 광학구조를 의미하는데, 렌즈, 프리즘, 반사경, 회절격자와 같은 소자종류의 결정, 굴절능 배분비, 소자간 거리, 양과 음의 렌즈 배치, 조리개 위치, 대칭성 또는 대칭성의 파괴정도, 수차 밸런싱 기법을 포함하는 용어라 할 수 있다. 그러므로 이와 같은 광학구조를 가장 잘 표현해 내는 구조함수를 정의하고 기존의 데이터들을 비교 분석하여 단순화하는 작업을 해 낼 수 있어야 한다. 예를 들면 현대의 카메라 렌즈에서는 통상 구면수차와 코마는 비구면을 활용하여 처리하므로 구조함수는 상면만곡과 왜곡수차 쪽에서 찾는 것이 좋을 것이다. 특히, 왜곡수차의 경우는 조리개를 기준으로 한 굴절능의 배분비 혹은 대칭성의 파괴정도에서 구조함수를 찾으면 좋을 것 같다. 더불어 마지막으로 본 구조함수개념을 모듈설계기법과 함께 활용하면 가장 강력한 설계 툴이 될 것으로 믿는다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 한남대학교 교비학술연구비로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Optical Research Associates, Inc., Pasadena, California, <http://www.opticalres.com>.
2. ZEMAX Development Corporation, Bellevue, Washington, <http://www.zemax.com>.
3. Lambda Research Corporation, Littleton, Massachusetts, <http://www.lambdaresearch.com>.
4. S. C. Park and Y. S. Kim, "Optical system design using lens modules I : optimum first order design in zoom lens," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **8**, 81-87 (1997).
5. S. C. Park and S. H. Lee, "Zoom lens design for compact digital camera using lens modules," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **16**, 34-42 (2005).
6. S. C. Park and B. T. You, "Ultra-compact zoom lens design for phone camera using hybrid lens system," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **19**, 349-359 (2008).
7. S.-C. Park, S.-H. Lee, and J.-G. Kim, "Compact zoom lens design for a 5x mobile camera using prism," *J. Opt. Soc. Korea* **13**, 206-212 (2009).
8. J. M. Ryu, G. M. Kang, H. J. Lee, H. K. Lee, and J. H. Jo, "Correction method for the variation of the image plane generated by various symmetric error factors of zoom lenses of digital still cameras and estimation of defect rate due to the correction," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **17**, 420-429 (2006).
9. N. J. Yoo, W. S. Kim, J. H. Jo, J. M. Ryu, H. J. Lee, and G. M. Kang, "Numerical calculation method for paraxial zoom loci of complicated zoom lenses with infinite object distance by using gaussian bracket method," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **18**, 410-420 (2007).
10. J. H. Jo, D. K. Lee, S. O. Lee, J.-M. Ryu, G.-M. Kang, and H.-J. Lee, "Numerical calculation for autofocus of zoom lenses by using gaussian brackets," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **20**, 166-174 (2009).
11. S.-S. Lee, *Geometrical Optics* (Kyohakyongusa, Seoul, Korea, 1985).
12. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering* (MacGraw-Hill, NY, USA, 2001).