반복적인 수차계산법을 이용하여 설계된 조리개가 외부에 위치한 Petzval lens

Optical design and analysis of Petzval lens with external entrance pupil using iterative aberration calculation method

최진, 공홍진, 이종웅*
한국과학기술원 물리학과, *청주대학교 정보기술공학부
jinchoi@kaist.ac.kr

일반적으로 광학설계는 형상 설계, 기초설계, 최적화를 통한 수차보정의 순으로 진행된다.[1] 자이델 3차수차를 이용하는 설계는 광학계의 기본적인 수차특성과 성능을 나타내기 때문에 기초설계에 적합한 방법이다.[2,3] 하지만, 자이델 3차수차는 광학계의 변수들, 즉, 렌즈곡률, 두께, 굴절률 등으로 이루어진 복잡한 함수이기 때문에, 렌즈의 개수가 많아지면 실제적으로 계산이 불가능하다. 따라서 렌즈 개수가 2개내지 3개로 구성된 간단한 광학계에서만 자이델 수차를 이용한 광학설계가 가능하다.

기존의 자이델 수차 계산은 설계하고자 하는 광학계의 수차를 구하고, 곡률 및 렌즈 두께 등을 변수로 두고 구면수차, 코마수차 등의 수차값이 0이 되는 변수를 얻는 방식을 사용하였다. 따라서 이 방법을 사용하는 경우, 렌즈 개수에 필연적인 제한을 가진다. 본 연구에서는 기존의 방식과 달리 전체군을 여러 개의 군으로 분리하고, 각각의 군에 대해서 수차를 계산한 다음, 각 군이 서로의 수차를 보정하도록 반복적인 계산을 수행하는 방법을 택하였다. 이 방법의 경우, 수차계산은 독립된 군에 대해서 이루어지기 때문에 기존의 방법에 비해 복잡한 광학계에 대한 계산이 가능하다.

이 방법의 적용으로, 조리개가 외부에 위치한 광학계를 설계하였다. 본 연구에서 설계하고자 하는 광학계는 조리개가 첫 번째 렌즈면에서 10mm 떨어져있고, F/2, 초점거리 50 mm, 시야각이 14도에 해당한다. 조리개가 외부에 위치한 광학계는 eyepiece, scanner, spectrometer, scanner같은 광학계에서 사용된다.[4]

설계하고자 하는 광학계의 기본구조로 Petzval 렌즈를 선택하였다. Petzval 렌즈는 굴절능이 양-양으로 배치된 구조를 취하고 있다. 전통적인 Petzval 렌즈의 구조는 전체의 굴절능이 1/f 일때 앞군(front lens)의 굴절능이 1/2f, 뒤군(rear lens)의 굴절능이 1/f로 배치된 형태를 지니고 있다. 이 구조의 경우, 각 군의 F수가 같게 되어 광선을 꺾을 때 걸리는 힘이 동일하게 배치된다. 설계하고자 하는 렌즈는 초점거리가 50 mm 이므로, 이 배치에 따라서 앞군이 100 mm, 뒤군이 50 mm 가 되게 하고 군간의 거리를 50 mm 로 두었다.

실제렌즈는 앞군을 3매접합렌즈로 뒤군을 2매접합렌즈로 두었다. 그리고 각 군의 렌즈 재질은 3매의 경우는 LaF2, NK5, SF4 로, 2매의 경우는 BK7, SF4 로 두었다. 렌즈 두께는 6 mm로 고정시키고, 렌즈 곡률만 변수로 두고 수차함수를 계산하였다. 설계된 광학계는 최종적으로 구면수차, 코마수차, 비점수차, 색수차가 보정된 해를 얻었다. 각각의 수차 보정은 다음과 같은 원리에 따라 이루어졌다. 구면수차는 각 군에 대해서 독립적으로 보정되였다. 코마수차와 비점수차는 각각의 군이 상대군의 수차를 보정하도록 반복적인 계산을 수행하여 얻었다. 그리고 색수차는 2매렌즈에 의해 발생된 수차를 3매렌즈가 보정하도록 하였다.

이 방법으로 얻어진 해는 앞쪽군에서 4가지, 뒤쪽군에서 2가지이다. 이 해들 중에 곡률반경이 너무

작지 않은 해와 상쇄되지 않은 상면만곡과 왜곡수차를 고려하여 적합한 해를 택하였다. 그리고 iteration에서 converge하지 않는 해도 제거되었다. 설계된 렌즈에 대해서 광선추적을 하면, 그림 1과 같다. 이 광학계의 경우, 양-양의 굴절능으로 구성된 Petzval 렌즈 타입이기 때문에, 상면만곡으로 인하여 성능이 저하된다. 상면만곡은 상면 근처에 field flattner를 넣어 보정하였다. 상면 근처에 위치한 field flattner는 전체 광학계의 초점거리나 수차에 크게 영향을 주지 않고 상면만곡을 보정하게 된다. 본 연구에서는 반복적인 수차계산법을 통하여 얻어진 설계결과에 상면만곡을 보정하는 field flattner를 넣은 후, 컴퓨터 최적화 프로그램을 이용하여 최적화하였다. 렌즈의 곡률, 렌즈사이의 거리, field flattner의 한쪽면의 곡률을 변수로 두고 최적화하면, 반복적인 수차계산법을 이용하여 설계된 광학계에서 크게 벗어나지 않는 구조의 광학계를 얻게 된다. 그림 2는 최적화된 Petzval 렌즈의 광선추적결과이다. 최적화전 구조와 비슷한 모양을 가짐을 확인할 수 있다. 컴퓨터 최적화를 통해서 구면수차, 코마수차, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차, 색수차가 모두 보정되었다. 본 광학계의 성능을 살펴보면, 최종 설계된 렌즈는 100 lp/mm의 공간주파수에서 0.3이상의 MTF값과 20μm의 작은 spot크기를 가진다.

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

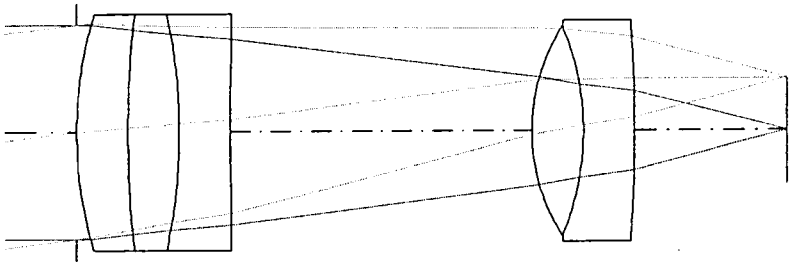

그림 1. 반복적인 수차계산법을 이용하여 설계된 Petzval 렌즈

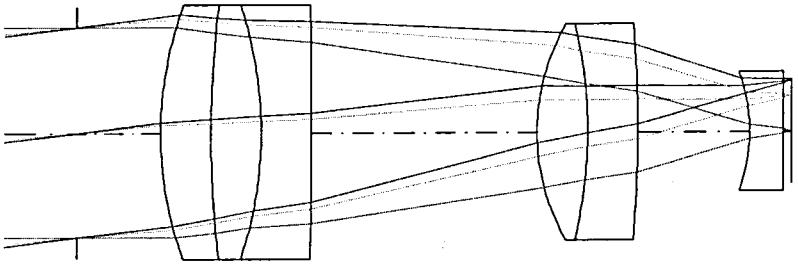

그림 2. 컴퓨터 최적화를 통해서 얻어진 최종결과

참고문헌

[1] M. Laikin, *Lens Design* (Marcel Dekker, New York, 1955).

[2] H. H. Hopkins and V. Venkateswara Rao, "The systematic design of two-component objectives", Opt. Acta. 17(7), 497 (1995).

[3] R. Kingslake, *Lens Design Fundamentals* (Academic, New York, 1978).

[4] W. J. Smith, *Modern Lens Design* (McGraw-Hill, New York, 1992).