

광선 역추적 방식을 이용한 구면수차 제거 비구면 렌즈의 설계

김한섭*, 박규열#, 이원규**, 전종업**

Design of Spherical Aberration Free Aspherical Lens by Use of Ray Reverse Tracing Method

Han Seob Kim*, Kyu Yeol Park#, Won kyu Lee**, Jeong Up Jeon**

ABSTRACT

In this study, aberration free aspherical lens design method named ray reverse tracing method is introduced. Differently from the traditional design method, the ray reverse tracing method traces the shape and location of a real object by use of its virtual image. From the result, especially spherical aberration free aspherical lens could be designed by use of the ray reverse tracing method. Furthermore, it could reduce the degree of dependence of optical characteristics on designer's ability, because deformation terms and optimization can be eliminated, which has been performed in conventional lens design process.

Key Words : Spherical Aberration(구면수차), Aspherical Lens(비구면 렌즈), Ray Reverse Tracing Method(광선 역추적 방식), Deformation term(비구면 계수)

1. 서론

내과 시술용의 내시경에 사용되는 소구경 렌즈에서부터 천체망원경에 사용되는 대구경 렌즈에 이르기까지 보다 정확하고 선명한 상을 얻기 위하여 고품질 렌즈의 재료기술, 설계기술 및 가공기술 등의 분야에서 다양한 연구가 수행되고 있다. 광학 렌즈에서 요구되는 가장 중요한 기능은 실물과 동일한 고품질의 형상을 구현하는 광학적 역할이다. 그러나 렌즈의 특성 중에 이러한 역할을 저해하는 요소로써 수차(Aberration)가 존재한다. 물

체공간에 있는 점을 다른 하나의 상공간으로 변환시키는 소자를 렌즈 혹은 광학계라 정의할 때 하나의 물체에 대하여 상의 왜곡이나 변형을 발생시키지 않으면서 명확하게 완벽한 상을 형성할 경우를 이상광학계라고 하며, 이와 같은 이상광학계의 성능에서 벗어나는 현상을 수차라 한다.^{1,2} 따라서 광학계의 성능을 향상시키기 위해 이들 수차의 영향을 제거하거나 줄이기 위한 연구들이 진행되고 있다. 대표적인 예로, 수차를 표현하는 수학적 수식을 고차식까지 적용하여 해석함으로써 수차를 감소시키는 방법³과 하나의 렌즈에 다양한 굴절률

접수일: 2003 년 2 월 19 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일

* 울산대학교 기계자동차공학부 대학원

교신지자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail: kypark@mail.ulsan.ac.kr, Tel: (052) 259-2862

** 울산대학교 기계자동차공학부

(Refractive index)을 가지도록 새로운 재료를 사용하는 방법^{4,5}도 제시되고 있다. 또한 가장 널리 이용되고 있는 방법으로는 수차 보정용 렌즈를 사용하여 광학계의 수차를 보정하는 방법⁵이 있다. 그러나 이 방법은 다수의 렌즈를 사용하게 됨으로써 전체적인 광학계가 복잡, 대형화되며 광학장비의 소형화와 경량화가 요구되는 최근의 추세에서 한계성을 가지고 있다고 할 수 있다.

현재, 대부분의 광학계는 수차의 보정을 포함하여 고기능, 고품질 광학계의 필요성과 소형화의 추세로 인하여 구면 렌즈 광학계에서 비구면 렌즈(Aspherical lens) 광학계로 변화되고 있다.^{6,7} 비구면 렌즈 광학계는 초점 집광 성능을 향상시켜 구면수차(Spherical aberration)를 제거하고 복잡한 렌즈 조합을 필요로 하지 않으며 높은 투과율이 얻어지는 등의 많은 장점을 가지고 있는 반면, 설계 및 제작상에 어려움을 가지게 된다. 따라서 오랜 기간의 경험에 의해서 근사해가 제시되어 있는 구면 렌즈의 사용이 선호되어 왔다.⁸ 그러나 최근에는 설계와 제작상의 어려움에도 불구하고 비구면 렌즈의 형상 및 광학적인 장점을 다양한 분야에서 활용하고자 하는 연구가 수행되고 있다. 일례로, 비구면 렌즈의 특수한 용도로써, DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)에서는 첨단 군사장비의 성능향상을 위하여 항공기의 캐노피(Canopy)와 미사일의 헤드부분 등과 같이 정보를 받아들이는 부분의 형상을 비구면으로 바꾸어 보다 넓은 시야를 확보하고 수차를 감소시켜 정보의 정확도를 높이려는 연구를 진행하고 있다.⁹ 이러한 광학적인 특성을 가지는 구조용 부품들의 경우 기본적인 구조 설계 위에 광학적인 설계가 고려된다. 따라서 종래의 광학 설계의 방법을 따르기 보다 공학적인 측면에서 광학 설계의 접근 방법이 요구된다. 또한 콘택트렌즈와 같은 경우 여러 가지 수차 중에서 구면 수차만을 고려하여 설계가 이루어지고 있다. 다른 수차들은 콘택트렌즈의 성능에 크게 영향을 미치고 있지 않아 무시할 수 있는 수차로 알려져 있다. 이러한 구조용 부품이나 콘택트렌즈와 같이 특정 수차만을 고려해도 무방한 제품의 경우 모든 수차를 고려하기 보다는 특정 수차만을 고려한 설계방법이 보다 효율적인 방법일수 있다.

비구면 렌즈는 구면 렌즈와 달리 하나의 곡률로 형상이 정의되지 않기 때문에 설계의 어려움을

가지게 된다. 일반적으로 사용되고 있는 축대칭 비구면 렌즈(Axisymmetric aspherical lens)의 경우에도 복잡한 고차항의 비구면 설계식의 적용이 불가피하며, 수식에 사용된 각각의 계수 값들은 렌즈의 특성에 중대한 영향을 미치게 된다. 또한 상용 프로그램을 이용하여 렌즈를 설계 시에 거치게 되는 최적화 과정 역시 렌즈의 특성에 큰 영향을 주게 된다. 그러나 렌즈의 설계에 있어서는 최적화 과정과 계수의 선택이 극히 중요한 요소임에도 불구하고 설계자의 경험과 지식에 의하여 임의로 선택되어지게 된다. 따라서 렌즈 설계를 위한 초기 값이 동일하더라도 렌즈의 광학적 특성은 설계자의 설계 경험과 능력에 따라서 다르게 나타날 수 밖에 없다는 문제점을 내포하고 있다.

이와 같은 배경을 토대로, 본 연구에서는 렌즈 설계에 있어서 광선 추적법의 변형된 방법을 이용하였다. 즉, 본 논문에서 제시하는 ‘광선 역추적 방식(Ray reverse tracing)’의 경우, Emil Wolf에 의하여 빛의 가역성(Reversibility of light)을 이용하는 유사한 모델이¹⁰ 제시되었으나 당시에는 모든 수차를 동시에 제거할 수 없다는 점에서 일반적인 적용이 무시되어 왔다. 그러나 최근에 광학기술의 발달과 더불어 전술한 바와 같이 구조용 부품들이 광학적인 기능을 가질 경우 혹은 콘택트렌즈와 같이 하나의 수차만을 고려하여 설계가 이루어질 경우에는 광선 역추적 방식의 적용이 제고될 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 광선 역추적 방법의 생산기술적 활용을 도모하기 위하여 전기의 Wolf에 의하여 제안되었던 광학설계 이론을 배경으로 하는 공학적 설계모델을 제시하였다. 또한 본 논문에서 제시하는 광선 역추적 방법에서는 기존의 광선 추적법을 이용하는 광학계의 설계에서 무시되어온 구면수차의 제거를 포함하는 설계 알고리즘을 적용한 것을 특징으로 하고 있다.

2. 구면수차와 광선 역추적

2.1 구면수차

일반적으로 광학기에 사용되는 구면 렌즈에는 여러 가지의 수차가 존재한다. 이와 같이 광학계가 가지는 여러 가지 수차 중에서도 특히 구면수차는 광학기의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소로서 취급되고 있다. Fig. 1은 구면수차의 영향을 나타낸다. 렌즈의 광축을 따라 평행하게 입사

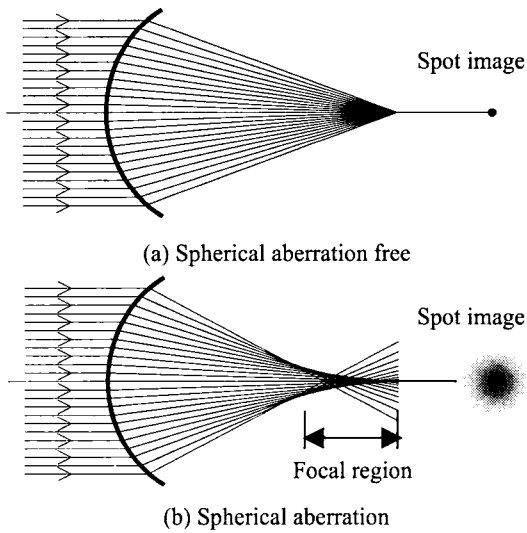
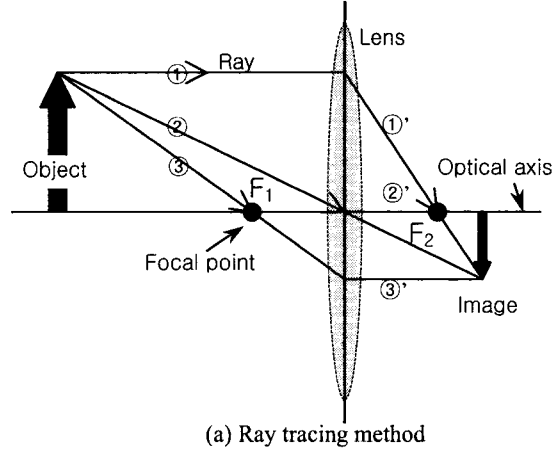


Fig. 1 Illustration of spherical aberration

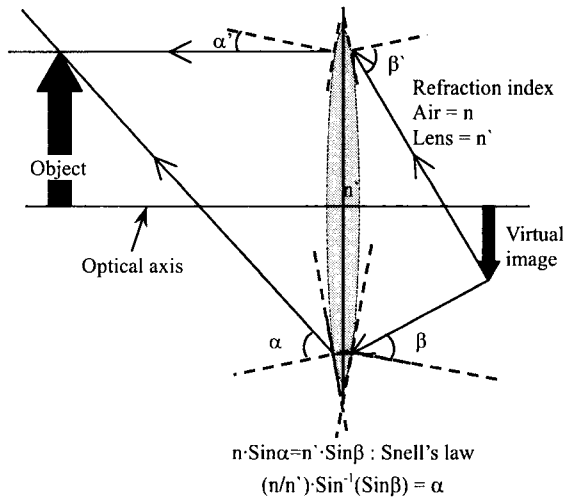
하는 광선은 렌즈를 통과한 후에 광축의 한 점에 모이게 되고 이 점을 초점(Focus)이라고 한다. 그러나 구면수차가 존재하면, Fig. 1 (b)에 나타낸 바와 같이, 렌즈의 초점은 기하학적 단일 점을 형성하지 못하고 일정한 영역을 가지게 되어 임의의 크기를 가지는 초점으로 형성된다. 이와 같은 현상은 광축과 평행하게 입사하는 광선이 광축으로부터 멀어질수록 구면 렌즈의 표면으로 입사하는 광선의 입사각(Incident angle)이 커지게 되고, 광축과 근접해 있는 근축영역을 통과하는 광선에 비해 상대적으로 굴절각(Refractive angle)이 커지게 되는데 기인하는 현상이다. 이때의 입사각과 굴절각의 관계는 Snell의 법칙^{1,5}으로 설명될 수 있으며, Snell의 법칙은 렌즈면을 통과하는 광선의 입사각, 굴절각, 그리고 렌즈 재료의 굴절률로 구성된 관계식이다. 구면수차는 구면수차의 발생기구에 의하면 구면 렌즈의 직경이 클수록 크게 나타나며, 또한 구면수차의 양은 초점의 크기에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 고기능, 고품질 렌즈의 설계에 있어서 특히 결상 기능에 커다란 영향을 미치게 되는 구면수차는 필수적으로 보정 되어야 한다.

2.2 광선 역추적 방식의 공학적 모델

일반적으로 기하광학에서 렌즈의 배율과 상의 위치를 작도하기 위한 고전적인 방법으로서 광선 추적방식(Ray tracing method)이 이용되고 있다.^{1,11}



(a) Ray tracing method



(b) Ray reverse tracing method

Fig. 2 Principle of ray (reverse) tracing method

Fig. 2 (a)는 광선추적방식의 기본 원리를 나타낸다. 이는 초점거리를 알고 있는 렌즈를 이용하여 물체의 크기, 위치가 변할 때 렌즈를 통한 상의 위치와 크기 등을 판단하는 간단한 방법으로서 다음과 같은 간단한 규칙을 가지고 있다.

1. 물체를 출발하여 렌즈에 평행하게 입사하는 광선①은 F_2 를 지난다.
2. 물체를 출발하여 F_1 을 지나서 렌즈를 통과한 후에 광축(Optical axis)과 평행하게 진행한다.
3. 물체를 출발해서 렌즈의 중심을 지나서 광선

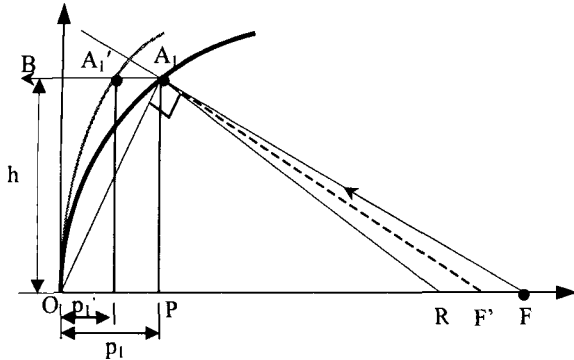


Fig. 3 Basic algorithm of spherical aberration removal by ray reverse tracing method

②는 굴절하지 않고 직진한다.

물체를 출발한 광선은 렌즈를 통과 후 렌즈의 초점거리, 물체와 렌즈와의 거리, 그리고 물체의 크기에 의해 상을 형성하게 된다. 광선 추적에서 모든 광선은 물체를 출발하여 렌즈에 의해 형성되는 상의 위치와 크기를 판단하기 위해 사용된다. 그러나 이 방법은 수차를 무시한 방법으로 이상적인 광학계로 가정했을 경우이며 Fig. 2 (a)의 이미지는 실제의 상의 형상과 다르게 나타날 수 있다.

그러나 본 연구에서는 구면 렌즈에서 발생하는 구면수차의 보정과 비구면의 생성을 위하여 광선 역추적 방법을 제안하였다. 이는 광선의 가역성을 이용한 방법으로 렌즈의 광학적 특성에 의하여 형성하고자 하는 가상의 상을 만든 후에 모든 광선을 물체에서부터 출발하지 않고 임의의 상에서 출발하여 실제 물체에 연결하는 방법이다. 이 방법은 렌즈가 가지고 있는 수차까지 고려한 방법으로서 가상의 상과 실제 물체와의 정확한 연결을 위해서는 렌즈의 형상변형을 수반하게 된다.

광선 역추적 방법의 원리를 설명하면 다음과 같다. Fig. 2 (b)와 같이 무한 거리에 있는 물체를 임의의 렌즈를 이용해 결상 시킬 경우 먼저 왜곡과 변형이 발생하지 않은 정확한 이미지를 가상으로 형성시킨다. 가상의 이미지에서 렌즈 면에 임의의 선을 그게 되면 이 선이 굴절광선(Refractive ray)이 되고, 이때 렌즈와 접하는 곳의 법선을 이루는 각이 굴절각으로 β 가 된다. 여기서 구한 β 를 스넬의 법칙에 대입하여 입사각 α 값을 구하여 실제 물체와 연결하게 된다. 그러나 이 경우에 렌즈

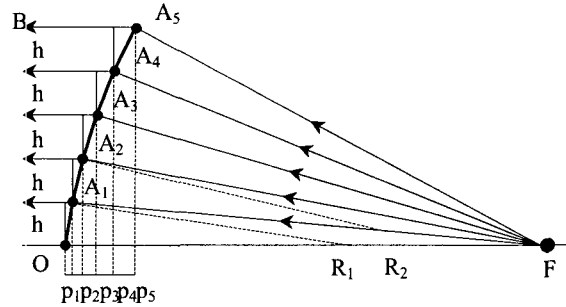


Fig. 4 Engineering model of aspherical lens design using ray reverse tracing method

에 수차가 존재하게 되면 가상의 상으로부터 렌즈면으로 연결한 굴절광선과 이 때의 굴절각을 이용하여 구한 입사각과 입사광선은 실제의 물체와 정확하게 연결되지 못한다. 따라서 스넬의 법칙을 이용하여 구한 입사각과 입사광선이 실제 물체와 정확히 연결되기 위해서는 렌즈면의 형상(곡률)이 필연적으로 변형되어야 한다. 이러한 광학적 성질을 이용하여 본 연구에서는 구면 렌즈의 구면수차를 제거하고, 비구면 렌즈의 형상을 설계하기 위한 목적으로 광선 역추적 방법을 이용하였다.

본 논문에서 적용을 제안한 광선 역추적 방식은 전술한 Emil Wolf의 이론적인 방법에 비하여 보다 구체적인 공학적 모델로 구체화한 것으로 평가될 수 있다. 광선 역추적 방법의 원리를 설명하면 다음과 같다. Fig. 2 (b)와 같이 무한 거리에 있는 물체를 임의의 렌즈를 이용해 F의 위치에 점으로 결상 시킬 경우, 점 F에서 임의의 렌즈면으로 임의의 직선을 긋는다. 직선과 렌즈면과 만나는 임의의 점을 A라고 할 때 AF 가 렌즈의 굴절광선이 되고 점 A에서의 법선과 AF 가 이루는 각이 굴절각 α 가 된다. 여기서 구한 굴절각과 실제 사용되는 렌즈의 굴절률을 Snell의 법칙에 대입하면 렌즈와 물체 사이의 입사각과 입사광선(Incident ray)을 구할 수 있다.

3. 구면수차의 제거와 비구면의 생성

3.1 구면수차의 제거

광학계에서 구면수차는 위에서 언급한 바와 같이, 렌즈를 통과한 평행광선이 하나의 점으로 모이지 않음으로써 해상도와 같은 광학적인 특성

$$\begin{aligned} \angle OFA &= \tan^{-1}\left(\frac{h}{(|OF|-p)}\right) \\ \angle ARF &= 180^\circ - \angle ORA = 90^\circ + \angle AOR \\ \angle FAR &= 90^\circ - \angle OFA - \angle AOR \\ &= 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{h}{(|OF|-p)}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{h}{p}\right) \quad (1) \end{aligned}$$

$$\angle ORA = 90^\circ - \angle AOR = 90 - \tan^{-1}(h/p) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\sin\left[90 - \tan^{-1}\left(\frac{h}{p}\right)\right] \\ &= n \sin\left[90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{h}{(|OF|-p)}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{h}{p}\right)\right] \quad (3) \end{aligned}$$

n: 렌즈재료의 굴절률

을 저하시키는 원인으로 작용한다. 그러나 구면수차가 완전히 제거된 렌즈의 경우에는 모든 평행광선이 완전한 하나의 점을 형성하게 된다. 광선추적에서 유한거리에 위치해 있는 물체는 다양한 각도를 형성하면서 렌즈로 입사하게 되어 물체의 형상과 같은 상을 형성하게 된다. 반면, 물체의 위치가 무한 거리에 있다면 물체에서 렌즈를 향하여 입사하는 모든 광선은 평행광선으로 취급되고 상은 하나의 점 즉, 렌즈의 초점을 형성하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 원리를 이용하고 광선 역추적 방법을 적용하여 구면수차를 제거하는 방법을 제안하였다.

Fig. 3은 광선 역추적 방법을 이용하여 구면수차를 제거하는 원리를 나타낸다. 구면 렌즈는 곡률반경과 재료의 굴절률만으로 근축영역에서의 초점거리를 계산식으로 쉽게 구할 수 있다. 초점거리가 알려진 임의의 구면 렌즈에서 구면수차를 제거하는 방법은 먼저, 광축상에 존재하는 렌즈의 초점(F)에서 구면수차를 제거하려는 렌즈의 임의의 위치(A)까지 선 A_1F 를 연결한다. 여기서 A_1F 는 렌즈와 상 사이의 굴절광선이 된다. 점 A는 렌즈면에 위치한 점이므로 렌즈의 곡률중심 R과 임의의 위치 점 A를 연결할 경우에 A_1R 은 위치 A에서의 법선이 되며, 법선과 굴절광선이 이루는 $\angle FA_1R$ 은 렌즈의 굴절각이 된다. 입사각은 렌즈의 굴절률과 앞서 구한 굴절각을 이용하여 구할 수 있다. 그러나 렌즈가 구면수차를 가지고 있기 때문에 이때 구한 입사각을 이용하여 렌즈와 실제 물체와의 사이의 입사광선을 표시할 경우에는 연

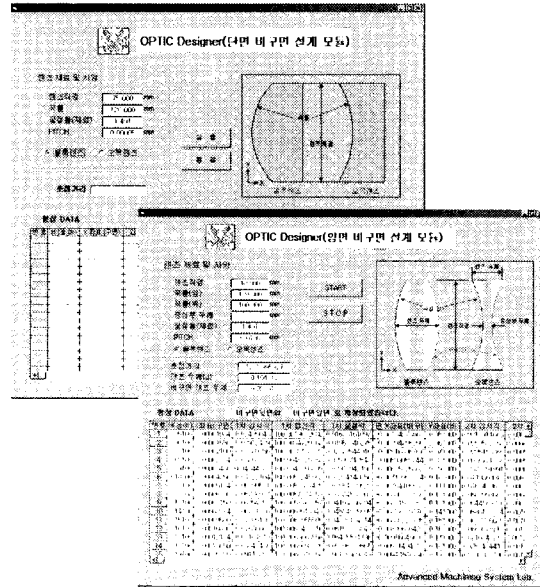


Fig. 5 Aspherical lens design module

결이 불가능하게 된다. 이를 가능하게 하기 위해서는 렌즈면에서의 형상(곡률)이 변형되어야 한다.

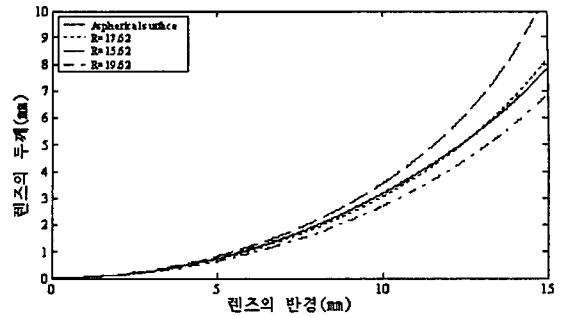
구체적으로, 광선 역추적 방법을 이용하여 구면수차를 보정하기 위해서는 먼저 렌즈가 가지는 구면수차가 정의되어야 한다. 이를 위하여 모든 입사광선은 광축과 평행하게 만들어져야 하며, 또한 모든 굴절광은 하나의 점에서 만나야 한다. 또한 점 F가 초점이 되기 위해서는 물체를 출발하여 임의의 위치 점 A_1 을 통과하는 광선은 광축과 평행한 광선이 되어야 하고, $\angle ORA$ 는 임의의 위치 A_1 에서의 입사각이 된다. 여기서 렌즈의 임의의 위치 A_1 을 통과하는 입사각과 굴절각은 Snell의 법칙을 만족해야 한다. 따라서 Snell의 법칙에 식(1)과 식(2)를 대입하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 렌즈에 있어서 구면수차는 식(3)에서 굴절률(n), 렌즈면에서 임의의 위치 A_1 의 높이(h), 그리고 초점거리는 상수로서 일정하므로 원점(O)에서 광축 방향의 임의의 위치 A_1 까지의 거리 p_1 에만 영향을 받게 된다. 따라서 Snell의 법칙을 만족시키는 정확한 p_1 값을 구하면 A_1 의 위치는 A_1' 으로 이동하게 되며 위치 A_1' 에서 구면수차는 완전히 제거된다.

실제로 구면수차를 제거하는 과정에서는 h를 매우 작은 값으로 설정하고 A_1 은 다음 A_2 의 원점

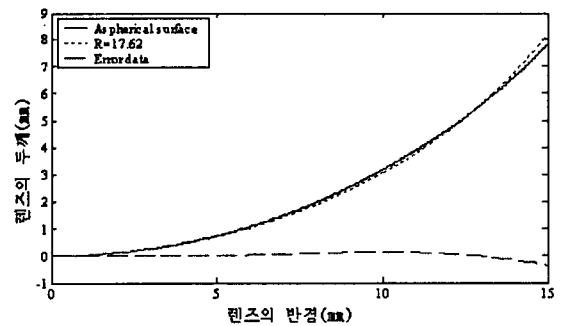
이 되도록 한다. h값의 누적이 렌즈의 반경과 같아질 때까지 이와 같은 과정을 반복하여 수행하면 렌즈면 전체에 있어서의 구면수차를 제거할 수 있게 된다. 일련의 과정을 통하여 구면 렌즈의 모든 점에서 구면수차가 제거되어 새롭게 형성된 렌즈의 면은 초기의 구면과는 다른 비구면의 형상을 가지게 된다.

3.2 비구면 렌즈의 설계

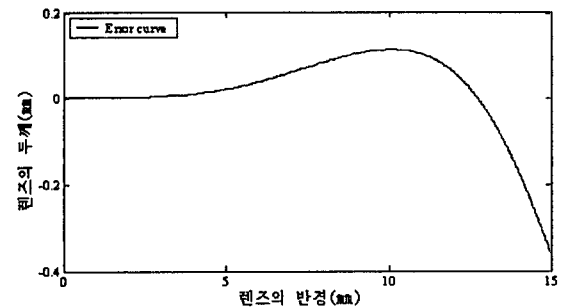
전술한 바와 같이, 광선 역추적 방법과 Snell의 법칙을 이용하여 구면 렌즈의 구면수차를 제거하기 위해서는 사용되는 구면 렌즈의 기본 데이터에 해당하는 초점거리와 곡률을 필요로 한다. 그러나 이러한 과정을 응용하면 구면 렌즈의 기본 형상이 정해지지 않은 상태에서 렌즈의 초점거리만을 이용하여 구면수차가 제거된 비구면의 형상설계가 가능하게 된다. 여기서 초점거리는 모든 렌즈의 설계 시에 기본적으로 주어지는 설계 데이터이다. 광선 역추적 방법과 초점거리만을 이용하여 구면수차가 제거된 비구면 렌즈의 형상을 설계하는 원리는 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 원점(O)에서 설계를 위해 주어진 초점거리 만큼의 위치에 초점(F)을 표시한다. 원점과 초점을 지나는 연장선이 설계할 렌즈의 광축이 된다. 3.1절에서 기술한 바와 같이, 구면 렌즈의 기본 형상이 주어진 상태에서 광선 역추적 방식을 적용하기 위해서는 원점에서 h만큼 떨어진 렌즈면 위에 임의의 점을 설정하고 이를 이용하여 Snell의 법칙을 적용하는 방식을 사용하였다. 그러나 렌즈의 기본 형상이 주어지지 않은 상태에서 초점거리만을 이용하여 광선 역추적 방식을 적용하고자 할 경우에는 원점에서 수직으로 h만큼 떨어진 위치에 임의의 점 A_1 을 설정한다. 여기서 A_1 의 위치가 원점과 광축 방향으로 동일한 좌표를 가진다는 것은 A_1O 가 광축에 수직인 면을 의미한다. 이 경우에 이 평면에 수직으로 입사하는 광선은 굴절하지 않고 직진하여 광축과 같은 역할을 하게 되지만 점 A_1 의 위치는 설계 과정에서 변하게 되므로 초기위치의 문제는 무시할 수 있다. 따라서 초점 F와 임의의 점 A_1 을 연결한 선은 굴절광선이 되고, A_1 을 지나면서 광축과 평행하도록 선을 그어서 입사광선을 만든다. 임의의 위치 점 A_1 과 원점을 연결하고 점 A_1 을 지나면서 A_1O 와 수직이 되는 선(A_1R_1)을 그어 이 선과 굴절광선이 이루는 각은 굴절각이 되고 입사광선과



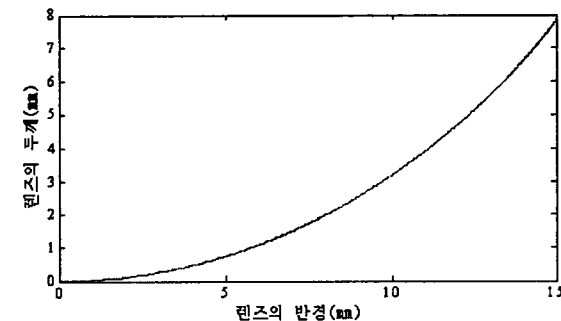
(a) Calculation of basic curvature for aspherical shape



(b) Calculation of error curve



(c) Curve fitting



(d) Compare with aspherical curves

Fig. 6 Generation of aspherical curvature and deformation term

이루는 작은 입사각이 된다. 이 후 굴절각과 입사각 그리고 렌즈재료의 굴절률을 이용하여 앞 절에서 설명한 구면수차의 제거방법과 동일하게 Snell의 법칙에 대입하여 전개하면 식(3)과 같이 원점과 A₁의 광축 방향의 거리에 관한 관계식으로 정리된다. 따라서 관계식을 만족하는 p₁값을 구하면 이 값이 A₁의 광축 방향의 좌표 값이 된다. Fig. 4에서 A₁은 A₂의 위치를 찾기 위한 원점이 되며, 이와 같은 일련의 과정을 요구되는 렌즈의 설계반경과 같아질 때까지 반복하면 비구면 렌즈의 형상이 설계되어진다. 이와 같은 방식을 적용하면 복잡한 고차항의 비구면 설계식을 이용하는 기존의 설계방식에 비하여 설계과정이 표준화될 수 있다는 장점을 가지는 것으로 판단할 수 있다.

3.3 비구면 렌즈의 설계모듈

Fig. 5는 본 연구에서 제안한 광선 역추적 방법을 이용한 비구면 렌즈의 설계과정을 PC상에서 구현하기 위하여 구성한 비구면 렌즈의 설계 모듈을 나타낸다. 본 모듈에서는 렌즈용 재료의 굴절률과 렌즈의 직경 및 구면 렌즈의 곡률을 입력하면 구면 렌즈의 수차제거 과정을 통하여 수차가 제거된 이상적인 비구면 형상의 설계가 가능하다. 또한, 구면 렌즈의 형상 데이터를 입력하지 않은 상태에서 초점거리만을 입력하는 경우에도 요구되는 광학적 성능을 얻을 수 있는 비구면 형상의 렌즈 설계가 가능하도록 구성되어 있다.

3.4 비구면 곡률과 계수 생성

일반적으로 비구면 렌즈의 설계에 있어서는 아래의 비구면 설계식이 사용되고 있다. 이 식에서 k값은 렌즈의 기본 형상으로 정의되는 값이며, 설계변수는 정점의 곡률과 비구면 계수 (Deformation term)가 된다. 단, 이 값들은 설계 과정에서는 유동적이며, 최적화를 통하여 최종적으로 결정되

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} \dots \quad (4)$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

c = 정점의곡률

k = conic constant

A, B, C, D: 비구면 계수

어 진다. 본 논문에서는 광선 역추적 방법을 이용한 비구면 형상의 설계 방법을 제시하였으며, 상기의 설계식을 사용하는 일반적인 설계방법과의 연계성을 고려하여, 비구면 렌즈의 형상 데이터로부터 역으로 정점의 곡률과 비구면 계수를 도출하는 과정의 예를 Fig. 6에 나타낸다. 여기서 사용된 비구면은 반경 15mm를 가지는 임의의 형상을 사용하였다.

Fig. 6 (a)는 주어진 비구면의 형상과 가장 근접한 구면 형상의 곡률을 찾는 과정이다. 비구면 렌즈의 형상에 근접하는 구면형상의 곡률을 도출하면 비구면과 가장 근접한 구면형상은 구면과 비구면이 교차하면서 이루는 면적이 가장 작을 경우에 해당하며 이때의 곡률을 비구면 정점의 곡률로 정한다. 여기서 선택한 곡선은 반경 17.82mm이며, 따라서 정점곡률은 0.0561167이 된다.

Fig. 6 (b)는 이때의 비구면과 구면이 완전히 일치하지 못하여 발생하는 오차 값을 구하는 과정이다. 오차 값은 동일한 x축의 위치에서의 y값의 차이를 나타내고 있으며, Fig. 6 (c)는 y축의 스케일을 변경하여 도시한 오차 값의 곡선 유형을 나타내고 있다. 이와 같은 과정을 통하여 얻어진 오차 값의 데이터를 이용하여 비구면 계수를 생성하는 것이 가능하다. 즉, 위에서 구한 오차의 데이터를 전기의 비구면 설계식으로 나타내면 각 항의 계수는 비구면 설계식의 계수가 된다. 그러나 비구면의 설계식에서는 다항식에서 짝수 차수의 항으로만 구성되어 있어 오차곡선을 통해서 얻어진 다항식에서 짝수 차수 항만의 계수를 그대로 사용하는 것은 곤란하다. 따라서 오차곡선을 이용하여 다항식을 만들 때 홀수 차수와 상수 항을 제외한 짝수 차수만으로 구성된 다항식으로 커브피팅을 하고 이때 구해진 각 항의 계수를 비구면의 계수로 사용하면 된다. 이와 같은 방식을 적용하여 다음과 같은 비구면 계수를 구하는 것이 가능하였다.

$$A = 0.0000399112$$

$$B = -0.0000003442$$

$$C = 0.0000000006$$

Fig. 6 (d)는 이와 같은 방법을 통하여 구해진 비구면 계수를 사용하여 생성한 비구면 형상과 초기의 기준 비구면의 형상을 비교한 결과이다. 초기의 기준 비구면과 가장 근접한 반경: 17.82mm, 정점곡률: 0.0561167를 가지는 구면형상과의 형상 오차를 나타내는 Fig. 6 (a)에 비하여 Fig. 6 (d)에서

는 형상오차가 거의 존재하지 않는 비구면 형상이 얻어지는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 결과는 비구면 렌즈의 형상 데이터로부터 렌즈 설계에 적용된 비구면 계수의 산출이 가능하며, 이를 이용하면 임의의 형상을 가지는 비구면 렌즈에 대한 설계정보를 추적하는 것이 가능하다는 사실을 시사하는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 광학 렌즈의 성능을 저해하는 구면수차를 제거하기 위한 방법으로 기존의 렌즈 설계방식과는 다른 새로운 방식의 광선 역추적 방법을 제안하였다. 또한 광선 역추적 방식을 이용하면 구면 렌즈에서 발생하는 구면수차의 제거는 물론 비구면 렌즈의 설계가 용이하다는 사실을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 광선 역추적 방법을 이용하여 구면수차가 제거된 비구면의 형상설계가 가능하다.
2. 광선 역추적 방법을 이용하여 비구면 렌즈를 설계할 경우에는 기존의 비구면 렌즈 방식에서 초기 설계 데이터로 사용되어지던 정점의 곡률과 비구면 계수가 불필요하며, 설계할 렌즈의 초점거리만으로도 비구면의 형상 설계가 가능하다.
3. 광선 역추적 방법을 이용하는 비구면 렌즈의 설계에서는 기존의 설계방식에서 수행하는 최적화 과정이 생략가능하며, 따라서 설계과정이 표준화될 수 있다는 장점을 가지게 된다.
4. 비구면 렌즈의 형상 데이터로부터 렌즈 설계에 사용되는 비구면 계수의 산출이 가능하며, 이를 이용하면 임의의 형상의 비구면에 대한 설계정보를 역으로 추적하는 것이 가능하다.

후 기

본 연구는 KITECH주관, 산업자원부 시행의 “고기능성 부품가공용 지능형 연삭시스템 연구개발”의 위탁과제로 진행되었습니다.

참고문헌

1. Hecht, Eugene, Optics, Addison-Wesley Pub. Co., 3rd ed., pp. 85-147, 247-280, 1998.
2. Song, T.-S., Lee, M.-D., Jun, H.-G., Park, N.-C. and Park, Y.-P., "Technical Trend of Optical Information Storage Device," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 4, pp. 25-36, 2001.
3. Beamonte, J. I., "Stability of the Spherical Aberration up to the Fifth Order in Cemented Doublets," J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2, pp. 161-168, 2000.
4. Roman Ilinsky, "Gradient-Index Meniscus Lens Free of Spherical Aberration," J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2, pp. 449-451, 2000.
5. Möller, K. D., Optics, University Science Books, pp. 1-73, 434-464, 1988.
6. Suzuki, H., Hara, S. and Matsunaga, H., "Study on Aspherical Surface Polishing Using a Small Rotating Tool," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 59, No. 10, pp. 1713-1718, 1993.
7. Itoh, S., "Study on Measurement of Axi Symmetrical Form Generated by Ultra-Precision Machining(3rd Report)," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 61, No. 3, pp. 391-395, 1995.
8. Lee, J.-S., Saeki, M., Kuriyagawa, T., Syoji, K., "A Study on the Mirror Grinding for Mold of a Small Aspherical Lens," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 12, pp. 82-87, 2001.
9. Erick Kreifeldt, "DARPA Turns Researchers Loose On New Class of Optics," Optics and photonics News, Vol. 8, No. 1, pp. 6-10, 1997.
10. Born, M. and Wolf, E., Principles of Optics, Cambridge University Press, 7th ed. pp. 204-227, 2002.
11. Jesus Atencia and Manuel Quintanilla, "Ray tracing for Holographic Optical Element Recording with Non-Spherical Waves," J. Opt. A: Pure Appl.