

# 광선 역추적 방식을 이용한 비구면 렌즈의 설계

김한섭<sup>†</sup> · 박규열<sup>\*</sup>

## Aspherical Lens Design by using Ray Reverse Tracing Method

Han-seob Kim, Kyu-yeol Park

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

### Abstract

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, it was convinced that 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.

### 1. 서 론

광학계의 성능을 크게 좌우하는 요소로써 수차가 존재한다. 수차란 물체공간에 있는 점을 다른 하나의 상공간으로 변환시키는 소자를 렌즈 혹은 광학계라 정의할 때 한 점에 대하여 완벽하게 1:1로 변환시키는 경우를 이상광학계라고 하며, 이와 같은 이상광학계의 성능에서 벗어나는 현상을 말한다<sup>(1,2)</sup>. 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 방법<sup>(3)</sup>과 하나의 렌즈에 다양한 굴절률(Refractive index)을 가지도록 새로운 재료를 사용하는 방법<sup>(4,5)</sup>도 제시되고 있다. 또한 가장 널리 이용되고 있는 방법으로는 수차 보정용 렌즈를 사용하여 광학계의 수차를 보정하는 방법<sup>(6)</sup>이 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<sup>(6,7)</sup>. 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. 이와 같은 연유에 오랜 기간의 경험에 의해서 근사해가 제시되어 있는 구면 렌즈의 사용이 선호되어 왔다<sup>(8)</sup>. 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<sup>(9)</sup>.

<sup>†</sup> 울산대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : Hanseob@mail.ulsan.ac.kr  
TEL : (052)259-1612 FAX : (052)259-1680

<sup>\*</sup> 울산대학교 기계자동차공학부

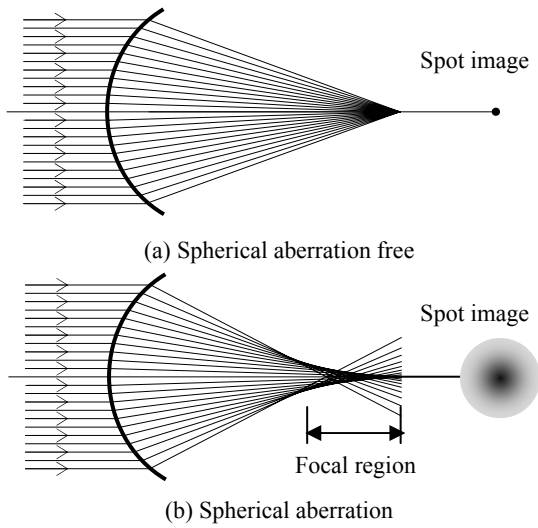


Fig. 1 Illustration of spherical aberration

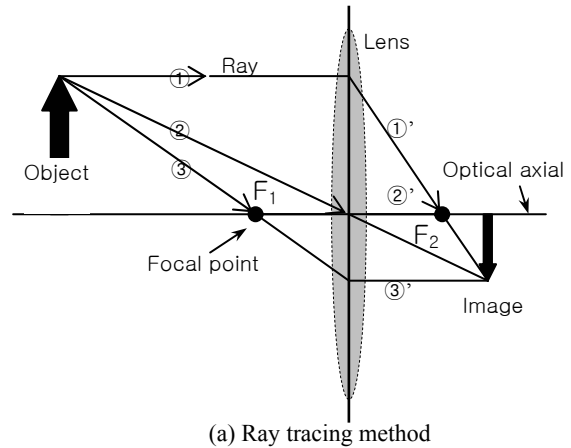
비구면 렌즈는 구면 렌즈와 달리 하나의 곡률로 형상이 정의되지 않기 때문에 설계의 어려움을 가지게 된다. 일반적으로 사용되고 있는 축대칭 비구면 렌즈(Axisymmetric aspherical lens)의 경우에도 복잡한 고차항의 비구면 설계식의 적용이 불가피하며, 수식에 사용된 각각의 계수 값들은 렌즈의 특성에 중대한 영향을 미치게 된다. 또한 상용 프로그램을 이용하여 렌즈를 설계 시에 거치게 되는 최적화 과정 역시 렌즈의 특성에 큰 영향을 주게 된다. 그러나 렌즈의 설계에 있어서는 최적화 과정과 계수의 선택이 극히 중요한 요소임에도 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.

본 연구에서는 렌즈설계와 관련하여 제시되고 있는 기존의 광선추적(Ray tracing)방식<sup>(1,10)</sup>과 개념을 달리하는 광선 역추적(Ray reverse tracing)방식을 고안하였다. 또한 광선 역추적방식을 이용하여 구면수차가 제거된 비구면 렌즈의 설계가 가능하다는 사실을 확인하였다.

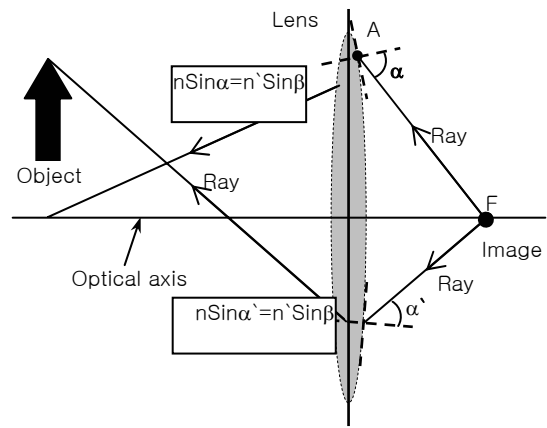
## 2. 구면수차와 광선 역추적

### 2.1 구면수차(Spherical Aberration)

일반적으로 광학기기에 사용되는 구면 렌즈에는 여러 가지의 수차가 존재한다. 이와 같이 광학계가 가지는 여러 가지 수차 중에서도 특히 구면수차는 광학기기의 성능을 좌우하는 가장 중요



(a) Ray tracing method



(b) Ray reverse tracing method

Fig. 2 Principle of ray (reverse) tracing method

한 요소로서 취급되고 있다. 그림 1은 구면수차의 영향을 나타낸다. 구면수차가 존재하면, 그림 1(b)에 나타난 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. 이 때의 입사각과 굴절각의 관계는 Snell의 법칙<sup>(1,5)</sup>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.

### 2.2 광선 역추적(Ray Reverse Tracing) 방식

기하광학에서 렌즈의 배율과 상의 위치를 작도

하기 위한 고전적인 방법으로서 광선추적방식이 이용되고 있다. 그림 2는 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 지나는 광선③은 렌즈를 통과한 후에 광축(Optical axis)과 평행하게 진행한다.
3. 물체를 출발해서 렌즈의 중심을 지나는 광선②는 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 본 연구에서는 구면 렌즈에서 발생하는 구면수차의 보정과 비구면의 생성을 위하여 광선 역추적 방법을 고안하였다. 이는 렌즈의 광학적 특성에 의하여 형성하고자 하는 가상의 상을 만든 후에 모든 광선을 물체에서부터 출발하지 않고 임의의 상에서 출발하여 실제 물체에 연결하는 방법이다. 광선 역추적 방법의 원리를 설명하면 다음과 같다. 무한 거리에 있는 물체를 임의의 렌즈를 이용해  $F$ 의 위치에 점으로 결상시킬 경우, 점  $F$ 에서 임의의 렌즈면으로 임의의 직선을 긋는다. 직선과 렌즈면과 만나는 임의의 점을  $A$ 라고 할 때  $\overline{AF}$ 가 렌즈의 굴절광선(Refractive ray)이 되고 점  $A$ 에서의 법선과  $\overline{AF}$ 가 이루는 각이 굴절각이 된다. 여기서 구한 굴절각과 실제 사용되는 렌즈의 굴절률을 Snell의 법칙에 대입하면 렌즈와 물체 사이의 입사각과 입사광선(Incident ray)을 구할 수 있다. 그러나 이 경우에 렌즈에 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 목적

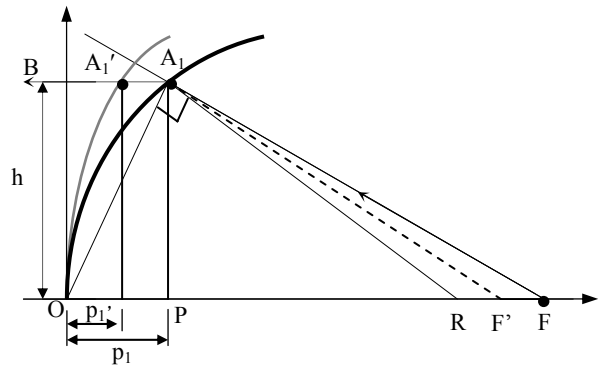


Fig. 3 Spherical aberration removal method (ray reverse tracing)

으로 광선 역추적 방법을 이용하였다.기에 2.1.1항의 내용을 입력한다.

### 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 특성을 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.

그림 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  $\overline{AF}$ 를 연결한다. 여기서  $\overline{AF}$ 는 렌즈와 상 사이의 굴절광선이 된다. 점  $A$ 는 렌즈면에 위치한 점이므로 렌즈의 곡률중심  $R$ 과 임의의 위치 점  $A$ 를 연결할 경우에  $\overline{AR}$ 은 위치  $A$ 에서의 법선이 되며, 법선과 굴절광선이 이루는  $\angle FA_1R$ 은 렌즈의 굴절각이 된다. 입사각은 렌즈의

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

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

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

$n$ : 렌즈 재료의 굴절률

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 연결이 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 광축(Optical axis)과 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)을 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  $h$ 를 매우 작은 값으로 설정하고  $A_1$ 은 다음  $A_2$ 의 원점이 되도록 한다.  $h$ 값의 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

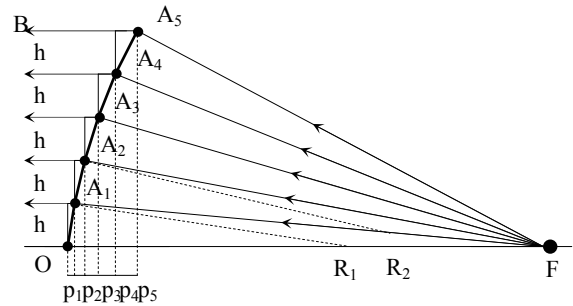


Fig. 4 Illustration of aspherical lens design using ray reverse tracing method

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 상태에서도 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 그림 4에 나타낸 바와 같다. 원점(O)에서 설계를 위해 주어진 초점거리 만큼의 위치에 초점(F)을 표시한다. 원점과 초점을 지나는 연장선이 설계할 렌즈의 광축이 된다. 앞 절에서 기술한 바와 같이, 구면 렌즈의 기본 형상이 주어진 상태에서 광선 역추적 방식을 적용하기 위해서는 원점에서  $h$ 만큼 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  $h$ 만큼 떨어진 위치에 임의의 점  $A_1$ 을 설정한다. 여기서  $A_1$ 의 위치가 원점과 광축 방향으로 동일한 좌표를 가진다는 것은  $\overline{A_1O}$ 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  $\overline{A_1O}$ 와 수직이 되는 선( $\overline{A_1R_1}$ )을 그

어 이 선과 굴절광선이 이루는 작은 굴절각이 되고 입사광선과 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 A<sub>1</sub>의 광축 방향의 거리에 관한 관계식으로 정리된다. 따라서 관계식을 만족하는 p<sub>1</sub> 값을 구하면 이 값이 A<sub>1</sub>의 광축 방향의 좌표 값이 된다. 그림 4에서 A<sub>1</sub>은 A<sub>2</sub>의 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 곡률과 계수 생성

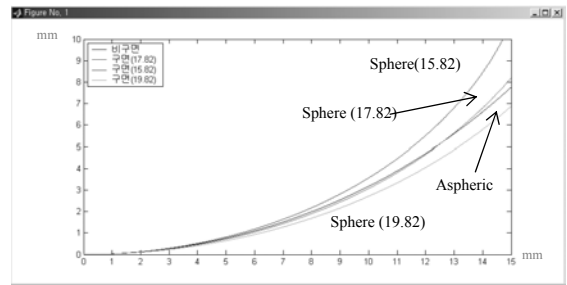
일반적으로 비구면 렌즈의 설계에 있어서는 아래의 비구면 설계식이 사용되고 있다. 이 식에서 k값은 렌즈의 기본 형상으로 정의되는 값이며, 설계변수는 정점의 곡률과 비구면 계수 (Deformation term)가 된다. 단, 이 값들은 설계 과정에서는 유

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

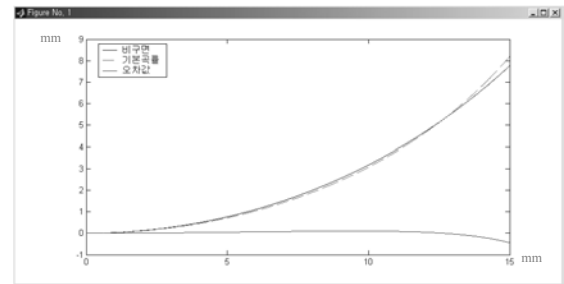
- $r^2 = x^2 + y^2$
- $c =$  정점의 곡률
- $k =$  conic constant
- A, B, C, D: 비구면 계수

동적이며, 최적화를 통하여 최종적으로 결정되어진다. 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 그림 5에 나타낸다. 여기서 사용된 비구면은 반경 15mm를 가지는 임의의 형상을 사용하였다.

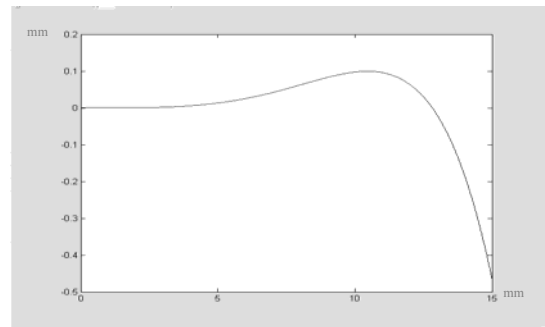
그림 5(a)는 주어진 비구면의 형상과 가장 근접한 구면형상의 곡률을 찾는 과정이다. 비구면 렌즈의 형상에 근접하는 구면형상의 곡률을 도시하면 비구면과 가장 근접한 구면형상은 구면과 비구면이 교차하면서 이루는 면적이 가장 작을 경우에 해당하며 이때의 곡률을 비구면 정점의 곡률로 정한다. 여기서 선택한 곡선은 반경 17.82mm이며,



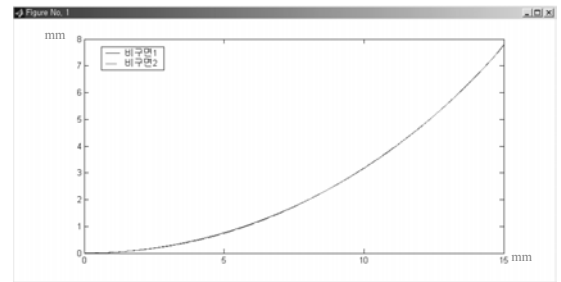
(a) Calculation of basic curvature for aspherical shape



(b) Calculation of error curve



(c) Curve fitting



(d) Compare with aspherical curves

Fig. 5 Generation of aspherical curvature and deformation term

따라서 정점곡률은 0.0561167이 된다.

그림 5(b)는 이때의 비구면과 구면이 완전히 일치하지 못하여 발생하는 오차 값을 구하는 과정이다. 오차 값은 동일한 x 축의 위치에서의 y 값의 차이를 나타내고 있으며, 그림 5(c)는 y 축의 스케일을 변경하여 도시한 오차 값의 곡선 유형을 나타내고 있다. 이와 같은 과정을 통하여 얻어진 오

차 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 상수항을 제외한 짝수차수만으로 구성된 다항식으로 커브피팅을 하고 이때 구해진 각 항의 계수를 비구면의 계수로 사용하면 된다. 이와 같은 방식을 적용하여 다음과 같은 비구면 계수를 구하는 것이 가능하였다.

$$A = 0.0000399112$$

$$B = -0.0000003442$$

$$C = 0.0000000006$$

그림 5(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: 0.0561167 를 가지는 구면형상과의 형상 오차를 나타내는 그림 5(a)에 비하여 그림 5(d)에서는 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. 결 론

본 연구에서는 기존의 렌즈 설계방식과는 다른 형태의 광선 역추적 방법을 제안하였다. 연구결과, 광선 역추적 방법을 이용하면 구면 렌즈에서 발생하는 구면수차의 제거는 물론 비구면 렌즈의 설계가 용이하다는 사실을 확인하였으며, 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 형상설계가 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 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Hecht, Eugene, 1998, Optics, 3rd ed., Addison-Wesley Pub. Co., USA, pp. 85 ~ 147, 247 ~ 280.
- (2) T.-S. Song, M.-D. Lee, H.-G. Jun, N.-C. Park, and Y.-P. Park, 2001, "Technical Trend of Optical Information Storage Device," J. of KSPE, Vol. 18, No. 4, pp. 25 ~ 36.
- (3) J. I. Beamonte, 2000, "Stability of the spherical aberration up to the fifth order in cemented doublets," J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2, pp. 161 ~ 168.
- (4) Roman Ilinsky, 2000, "Gradient-index meniscus lens free of spherical aberration," J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2, pp. 449 - 451.
- (5) K. D. Möller, 1988, Optics, University Science Books, USA, pp. 1 ~ 73, 434 ~ 464.
- (6) Suzuki, H., Hara, S., and Matsunaga, H., 1993, "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.
- (7) Itoh, S., 1995, "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.
- (8) J.-S. Lee, M. Saeki, T. Kuriyagawa, K. Syoji, 2001, "A Study on the Mirror Grinding for Mold of a Small Aspherical Lens," J. of KSPE, Vol. 18, No. 12, pp. 82 ~ 87.
- (9) Erick Kreifeldt, 1997, "DARPA Turns Researchers Loose On New Class Of Optics," Optics and photonics News, Vol. 8, No. 1, pp. 6 ~ 10.
- (10) Jesus Atencia and Manuel Quintanilla, 2001, "Ray tracing for holographic optical element recording with non-spherical waves," J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 3 pp. 387 ~ 397.