

구면수차 보정을 이용한 비구면 렌즈의 형상설계

김한섭*(울산대 대학원 기계공학과), 박규열, 전종업(울산대 기계공학과)

Design of Aspherical Lens Shape by Modification of Spherical Aberration

H. S. Kim(Mecha. Eng. Dept. Ulsan Univ.), K. Y. Park, J. U. Jeon(Mecha. Eng. Dept., Ulsan Univ.)

ABSTRACT

In this research, the modification method of spherical aberration, and aspherical lens shape design method were investigated. Spherical aberration affects lens's performance directly. Many studies have attempted to remove spherical aberration with a lot of methods in order to reduce the bad effect of spherical aberration. The approach to lens shape design was base on the ray tracing method. From the result, it was confirmed that ray reverse-tracing method was convenient to remove spherical aberration, and could be used very effectively and usefully for aberration-free aspherical lens design.

Key Words : Aberration(수차), Spherical aberration(구면수차), Aspherical lens(비구면 렌즈), Ray reverse-tracing(광선 역추적), Lens design(렌즈설계)

1. 서론

내과 시술용의 내시경 등에 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. 각종 렌즈에서 요구되는 가장 중요한 기능으로는 실물과 동일한 고품질의 결상을 구현하는 광학적 역할을 들 수 있다. 그러나 렌즈의 설계에서는 이러한 기능을 저해하는 요소로 각종 수차(aberration)가 존재하고 있다. 수차의 존재는 렌즈를 통하여 얻어지는 결상을 불명확하게 하거나 원래의 상을 변형시킴으로써 렌즈의 광학적 특성을 저하시키며, 따라서 다양한 방법을 통하여 수차를 감소 또는 억제하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 수차를 감소시키기 위한 방법으로는 수차를 표현하는 수학적 수식에서 가능한 높은 차수의 수식을 적용함으로써 수차를 감소시키는 방법^[1], 하나의 렌즈에 다양한 굴절률을 가지도록 새로운 재료를 사용하는 방법^[2], 수차보정용 렌즈를 수차를 가지고 있는 렌즈와 동시에 사용함으로써 광학계의 수차를 보정하는 방법^[3] 등이 제시되고 있다. 또한 최근에 다양한 용도로 사용되고 있는 비구면 렌즈의 경우에도 수차문제를 해결하기 위한

수단으로 활용될 수 있다.

한편, 각종 수차 중에서도 구면수차(spherical aberration)는 렌즈의 결상기능을 저해하는 큰 요인으로 알려지고 있으며, 모든 광학기기는 렌즈가 가지는 구면수차의 정도에 따라서 분해능이나 선명도가 결정되어진다. 즉, 광학기기가 높은 고분해능과 선명도를 가지기 위해서는 렌즈의 설계 단계에서 가능한 작은 초점(또는 기하학적 단일 초점)을 가지는 형상이 요구되는 반면, 구면수차가 존재할 경우는 초점의 크기가 상대적으로 커짐으로써 결상의 기능이 저하된다는 사실을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 렌즈의 설계에 있어서 구면수차를 제거하기 위한 방법으로 광선 역추적(ray reverse tracing) 방식을 이용하여 구면렌즈의 구면수차를 보정한 비구면 렌즈를 설계하였다.

2. 광학계에서 수차의 영향

렌즈의 설계에 있어서 가우스의 이상적인 조건으로부터 벗어나는 것으로 정의^[4]되는 수차에는 여러 가지 종류가 있으며 렌즈의 용도나 사용되는 광선의 종류에 따라서는 무시 가능한 수차도 존재한다 그러나 모든 종류의 수차를 동시에 100% 제거할 수 없다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다^[4]. 따라서 렌

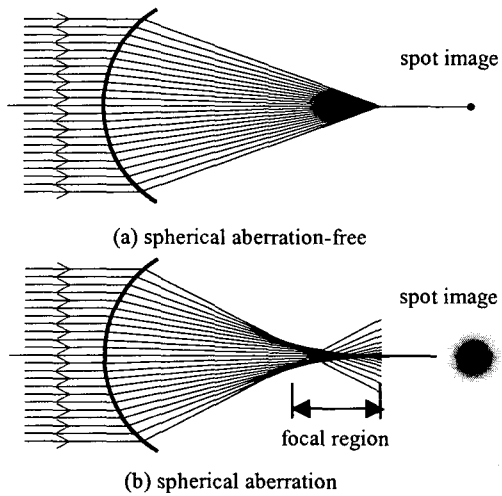


Fig. 1 Illustration of spherical aberration

즈의 설계 시에는 일반적으로 사용용도와 목적을 고려하여 필요한 수차를 보정하는 방법으로 설계가 이루어진다. 수차는 크게 단색수차와 색수차로 구분된다. 단색수차에는 상을 불명확하게 하여 훼손시키는 구면수차, 코마(coma), 비점수차(astigmatism)가 있으며, 이것에 더해서 상을 변형시키는 페쯔발 만곡수차(Petzval field curvature)와 왜곡수차(distortion)로 분류될 수 있다⁽⁴⁾. 이 중에서 렌즈의 성능에 가장 크게 영향을 주는 것이 구면수차이다. Fig. 1은 구면수차가 결상의 정도에 미치는 영향을 나타낸다. 구면수차가 존재하지 않을 경우에는 광축(optical axis)에 평행하게 입사하는 광선들은 렌즈의 초점에 하나의 점을 형성하게 된다. 그러나 구면수차가 존재하는 경우에는 모든 광선들에 대해 렌즈는 하나의 초점을 형성하지 않고 광축을 따라서 특정한 초점영역을 형성하게 된다. 따라서 Fig. 1(B)에 나타난 바와 같이, 초점은 기하학적 단일 점이 아닌 임의의 크기를 가지게 되며, 그 결과로 렌즈의 결상기능이 저하된다. 즉, 수차의 포함 정도는 초점의 크기에 영향을 미치게 되며, 이로 인하여 측정기나 광학장비의 선명도와 분해능 또는 해상도를 저해하는 작용을 한다. 따라서 렌즈의 설계에 있어서 특히 결상기능에 커다란 영향을 미치게 되는 구면수차의 보정은 필수적으로 고려되어야 한다.

3. 비구면 렌즈의 설계 및 평가

동일한 초점거리를 가지는 렌즈에 있어서 비구면 렌즈를 사용하면 구면렌즈에 비해 렌즈의 두께가 상당히 감소되어 경량화 및 소형화의 효과가 얻어지는 것으로 알려져 있다. 또한 구면 렌즈가 가지고 있는 여러 가지 수차를 보정하는 설계가 가능하므로 선명도나 해상도가 구면렌즈에 비해 상당히 향상될

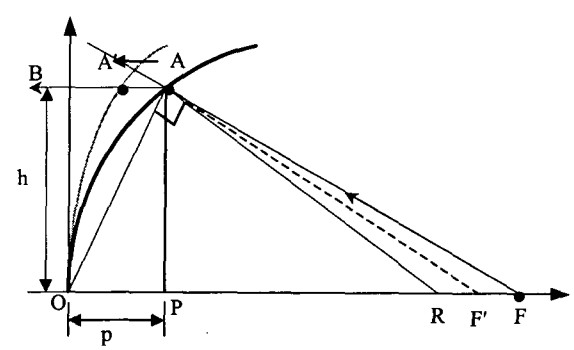


Fig. 2 Spherical aberration removal method(ray reverse-tracing)

뿐만 아니라 전체 광학계에 사용되는 사용될 렌즈의 수량을 줄일 수 있다는 장점도 얻어진다. 단, 비구면 렌즈는 구면렌즈에 비하여 설계 및 제작이 어려운 것이 단점으로 지적된다.

3.1 광선 역추적 방식을 이용한 구면수차의 보정기법

구면렌즈에서 발생하는 구면수차의 제거를 위해서 여러 가지 방법이 적용가능하며, 비구면 렌즈의 유래는 여기서 시작되었다고 볼 수 있다. 구면수차의 제거를 위한 방법으로는 일반 수차의 보정방법과 동일하게 1)수차보정용 렌즈의 사용, 2)렌즈재료의 굴절율을 이용하는 방법, 3)구면렌즈와 동일한 특성을 가지는 비구면 렌즈를 제작하는 방법 등을 들 수 있다.

한편, 본 연구에서는 구면렌즈에서 발생하는 구면수차를 보정하기 위하여 광선을 역추적하는 방법을 사용하였다. 일반적으로 광선추적^(3,4)방법은 입사하는 광선이 렌즈의 각 면을 지날 때 각각의 굴절각 등을 계산하면서 광선의 경로를 추적하여 최종 광의 위치를 확인하는 일련의 계산과정으로 진행된다. 그러나 본 연구에서는 광선이 도착할 최종 위치(본 연

$$\begin{aligned} \angle ORA &= 90^\circ - \angle AOR \\ &= 90 - \tan^{-1}\left(\frac{h}{p}\right) \dots \dots \dots \text{입사각(1)} \end{aligned}$$

$$\angle OFA = \tan^{-1}\left(\frac{h}{(|OF| - p)}\right)$$

$$\angle ARF = 180^\circ - \angle ORA = 90^\circ + \angle AOR$$

$$\begin{aligned} \angle FAR &= 90^\circ - \angle OFA - \angle AOR \\ &= 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{h}{(|OF| - p)}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{h}{p}\right) \dots \dots \dots \text{굴절각(2)} \end{aligned}$$

구에서는 초점의 위치)를 정하고 이점으로부터 역으로 광선을 추적하는 방법을 제안하였다. 앞 절에서 언급한 바와 같이, 구면수차가 존재하는 구면렌즈를 지나는 모든 광선은 모두 다른 위치에서 광축과 만나게 된다. 따라서 렌즈의 설계 시에 필요한 초점거리가 정해지면 이 점에서부터 광선을 역추적하여 광선의 입사조건을 만족시킬 경우 결과적으로 구면수차는 제거되는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 2는 광선 역추적 방법을 이용한 구면수차의 보정방법의 개념도이다. 동 그림에서 점 F는 초점을 나타내며, |OF|는 설계초점거리(focal length)로서 그 연장선은 광축(optical axis)이 된다. 구면렌즈에서 원점O로부터 입의의 높이 h에 A를 표시하고 초점 F와 연결하면 AF는 수차가 제거된 후 굴절광이 된다. 그러나 실제 렌즈의 굴절광은 구면수차의 영향으로 AF'가 된다. 그리고 구면수차의 정의에 의해 렌즈에 입사하는 광선은 광축에 평행하여야 하므로 A를 지나고 광축에 평행한 직선을 긋고 끝점을 B라 하면 이 때 BA는 입사광이 된다. 이 때 원점과 A점과의 광축상의 길이를 p라고 하면, Fig. 2의 입사각과 굴절각은 다음과 같이 h, p로 나타낼 수 있다. 렌즈에서 h와 p 값은 광선이 입사하는 지점의 좌표값이 된다.

이 때 식 (1)과 (2)는 다음의 스넬의 법칙^[6]을 만족해야 하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

상기의 식에서 h는 렌즈에 입사하는 광선의 y좌표

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

n: 렌즈 재료의 굴절률

값으로서 상수처리가 가능하므로 p에 따라서 입사각과 굴절각은 변하게 된다. 따라서 구면렌즈의 A점을 동일높이에서 식(3)을 만족하는 p의 값을 구하고 그 거리에 A'에 위치시키면 구면수차가 제거된 비구면의 렌즈형상을 얻을 수 있다.

3.2 광선 역추적 방식을 이용한 구면수차 보정 비구면 렌즈의 설계

렌즈의 초점거리를 임의로 설정한 후에, 전술한 광선 역추적 방식을 이용하여 구면수차를 보정한 비구면 렌즈를 설계하였다. Fig. 3은 광선 역추적 방식에서의 렌즈의 곡률과 초점거리의 관계를 나타내며, F는 임의로 설정된 렌즈의 초점거리를 표시한다. 동 그림에서 A₁점은 구면렌즈의 곡률상의 위치가 아닌 원점O로부터 수직선을 긋고 입의의 높이 h에 A₁을

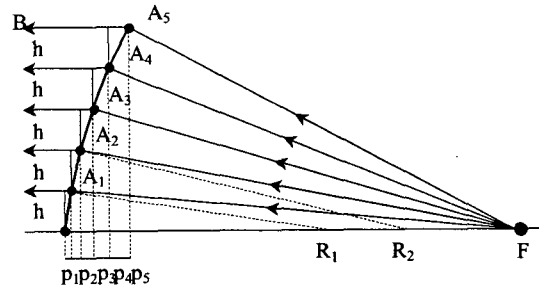


Fig. 3 Illustration of aspherical lens design using ray reverse-tracing method

로 표시하며 입사광 BA₁에 대한 굴절광은 A₁F가 된다. 이 때 ∠FR₁A₁은 굴절각이 되며 이 굴절각에 대한 입사각은 OA₁과 수직을 이루는 법선과의 각도이므로 0°이 된다. 그러나 실제 렌즈에서 입사각이 0°일 경우 광선은 굴절을 일으키지 않으며 평면 렌즈가 아닌 경우 입사각이 0°이란 것은 입사광선이 광축 위에서 광축을 따라 입사하는 것을 의미한다. 따라서 입의의 점 A는 점 O를 지나는 수직선 상에 존재할 수 없게 되어 좌우로 이동해야만 하며 이 지점은 필히 식(3)을 만족하는 값을 가져야 한다. 이 때 구하여진 A₁은 A₂의 원점이 되며, 앞에서와 동일한 방법으로 A₁에서 수직선을 긋고 높이 h 지점에 A₂를 표시하고 초점 F와 연결하면 A₂에서의 굴절광이 된다. p₂ 역시 식(3)을 만족하는 값을 가져야 하며, A₂의 y좌표값은 p₁+p₂ 된다.

3.3 계산 과정과 비구면의 평가

광선 역추적 방법에서는 p값에 의하여 수차의 보정 및 이에 따른 비구면 형상이 결정되어진다. 본 연구에서는 p를 구하기 위하여 Fig. 4와 같은 무한 loop를 사용함으로써 결과치의 정확도를 높이고자 하였다. 상기 loop에서 a값은 p의 증가량을 나타내며 구면수차를 완전하게 제거하기 위한 p값이 거의 무한소수로 나타나는 것을 확인하였다. 일례로, F=50, h=5, n=1.5의 값을 설정하면 렌즈의 첫번째 h의 높이

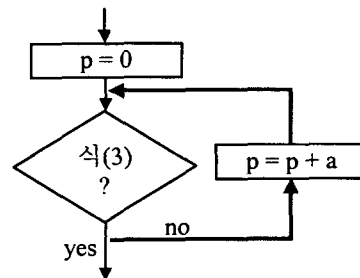


Fig. 4 Calculation diagram

에서 p 값은 10^{-14} 자리의 값을 가지게 된다. 따라서 a 는 가능한 작은 값을 설정하는 것이 높은 정확도를 가지는 p 값을 구할 수 있으나 a 를 작게하면 상대적으로 연산과정에 많은 시간이 소요되며 연산기의 높은 용량이 필요하게 된다. 또한 실제 렌즈의 설계에서 구면렌즈의 경우에는 렌즈 표면이 단일 곡률의 곡선으로 이루어지는 반면, 본 연구에서 제시한 방법의 경우에는 각각의 h 값에 의한 점들을 직선으로 연결을 하기 때문에, 전기의 Fig. 3에서와 같이, h 값이 클 경우에는 렌즈의 표면에 변곡점이 발생하게 된다. 이와 같이 변곡점이 발생되면 렌즈를 통하여 결상된 형상을 왜곡시키는 등 렌즈의 성능에 치명적인 악영향을 미치게 된다. 따라서 요구되는 렌즈의 성능을 고려하여 적절한 h 값을 선택함으로써 변곡점의 영향을 최소화하는 것이 바람직한 것으로 판단할 수 있다.

한편, 비구면 렌즈는 단면 비구면 렌즈(구면-비구면)와 양면 비구면 렌즈(비구면-비구면)로 분류할 수 있다. 단면 비구면 렌즈의 경우 하나의 비구면으로 수차를 제거하는 경우이며, 양면 비구면일 경우에는 두면이 동시 작용을 하여 수차를 제거하는 렌즈이다. 양면 비구면 렌즈일 경우에는 동일한 기능을 가지는 단면 비구면 렌즈에 비하여 두께가 감소하게 되며 렌즈의 기능 또한 향상되는 반면에, 고도의 설계기술을 요구하게 된다. 그러나 본 연구에서 제시한 광선 역추적 방법을 양면 비구면 렌즈의 설계에 적용하면, 한쪽 면에 대한 p 값의 유효자리 수를 설정하여 일차적으로 수차를 제거한 후에 반대면에서 최종적으로 나머지 수차를 제거하는 방법을 적용하는 것이 가능하므로 양면 비구면 렌즈의 설계가 용이해지는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 구면 수차의 발생원인과 영향을 조사하고, 구면수차를 제거하기 위하여 광선 역추적 방법을 이용하는 렌즈설계방법을 제안하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 광선 역추적 방식을 사용함으로써 구면렌즈의 구면수차 보정이 가능하다.
2. 광선 역추적을 이용한 수차보정 방법을 적용한 비구면 렌즈 설계의 경우, 구면렌즈의 곡률반경과 이를 이용한 초점거리 계산이 불필요하다. 단지 렌즈의 초점거리와 직경 및 재료의 굴절률만이 주어지면 구면수차가 제거된 비구면 렌즈의 설계가 가능하다.
3. 비구면 설계과정에서 렌즈의 생성되는 형상 데이터를 렌즈의 가공 데이터로 활용 가능하므로 렌즈 개발기간의 단축효과가 기대된다.

5. 향후 연구방향

1. 광선 역추적 방법을 이용하여 생성된 비구면의 경우, 본문에서 기술한 바와 같이, 각 점이 직선으로 연결되어지므로 가능한 한 h 값을 작게 설정하는 것이 필요하나, 실제 렌즈의 성능에 변곡점이 미치는 영향에 관한 정량평가가 필요함.
2. 비구면 설계에서 고려되어야 하는 파면수차와 비점수차 등을 포함하여 본 연구에서 고려되지 않은 자이델 수차의 발생원인과 제거방법 그리고 각각의 상호 연관관계를 규명하여 비구면 설계에 적용.
3. 본 연구에는 광선 역추적 방법을 이용하는 과정에서 p 값을 무한루프의 연산방법을 이용하여 반복 계산하여 구하였으나, 이 방식에서는 계산의 정밀도를 높이기 위해서는 많은 시간이 소요되므로 p 값의 해석해를 구하기 위한 수식의 정립이 필요.

후 기

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

참고문헌

1. J. I. Beamonte, "Stability of the spherical aberration up to the fifth order in cemented doublets", J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2, pp. 161-168, 2000.
2. Roman Ilinsky, "Gradient-index meniscus lens free of spherical aberration", J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2, pp. 449 - 451, 2000.
3. Jesus Atencia and Manuel Quintanilla, "Ray tracing for holographic optical element recording with non-spherical waves", J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 3 pp. 387-397, 2001.
4. Hecht, Eugene., "Optics", Addison-Wesley Pub. Co., 2nd ed., pp211~239, 1987.
5. 장경애, "Optics", 도서출판 성학당, pp97~129, 2001.