

구면 수차를 이용한 비구면 렌즈의 설계와 수차 측정 장치 개발

박규열*, 김한섭†

(논문접수일 2007. 6. 26, 심사완료일 2007. 8. 31)

Aspherical Lens Design and Development of Spherical Aberration Measuring System by use of Spherical Aberration

Kyuyeol Park*, Hanseob Kim†

Abstract

In this paper, an aberration free aspherical lens is designed and machined by new design method and the spherical aberration measuring system is developed. It confirmed the propriety of new design method by measuring optical characteristics of machined lens with the new measuring system. The system could measure a spherical aberration quantitatively by using CCD camera, laser, collimator and so on.

Key Words : Spherical aberration(구면수차), Aspherical lens(비구면 렌즈), Aberration Measuring System(수차측정장치)

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⁽¹⁻⁵⁾. 광학 렌즈에서 요구되는 가장 중요한 기능은 실물과 동일한 고품질의 형상을 구현하는 광학적 역할이다. 그러나 렌즈의 특성 중에 이러한 역할을 저해하는 요소로서 수차(Aberration)가 존재한다. 즉, 물체공간에 있는 점을 다른 하나의 상공간으로 변환시키는 소자를 렌즈 혹은 광학계가

정의할 때 하나의 물체에 대하여 상의 왜곡이나 변형을 발생시키지 않으면서 명확하게 완벽한 상을형성할 경우를 이상광학계라고 하며, 이와 같은 이상광학계의 성능에서 벗어나는 현상을 수차라 한다⁽⁶⁻⁸⁾. 따라서 광학계의 성능을 향상시키기 위하여 이들 수차의 영향을 제거하거나 경감시키기 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있다⁽⁹⁻¹⁰⁾. 비구면 렌즈는 크기, 모양, 용도 및 광학적 기능 등에 따라서 분류할 수 있으며, 각각의 비구면 렌즈에 요구되는 광학적 특성을 충족시킬 수 있도록 설계 변수가 설정, 조정된다. 또한 특정 수차가 광학계의 품질에 현저하게 영향을 미치는 경우에는 다른 수차는 무시하고 특정의 수차를 제거할 수 있는 설계방안이

* 울산대학교 기계자동차공학부 (kypark@ulsan.ac.kr)
주소: 680-749 울산시 남구 무거동 산29

† 울산대학교 기계자동차공학부

요구된다. 따라서, 전술한 바와 같이, 특정한 용도로 사용되는 구조용 광학계 또는 픽업용 렌즈와 같이 특정 수차만을 고려해도 무방한 광학계의 경우에는 모든 수차를 고려하여 설계하기 보다는 특정 수차만을 보정하기 위한 설계방법이 설계의 생산성 측면에서 보다 효과적인 방법으로 판단할 수 있다. 본 논문에서는 구면 수차를 제거한 비구면 렌즈의 설계 및 제작과 렌즈가 가지는 구면 수차의 정량적 계량을 위한 측정 장치를 고안하였다.

2. 비구면 렌즈의 설계

2.1 구면 수차

Fig. 1은 광학렌즈의 기본적인 형태에 해당하는 구면렌즈와 비구면 렌즈를 나타내고 있으며 구면 렌즈에 있어서 구면 수차의 발생원인, 영향 및 종류를 나타낸다. Fig. 1(b)와 같이 구면수차가 존재하지 않을 경우에는 광축(Optical axis)에 평행하게 입사하는 광선들은 렌즈의 초점면에 하나의 초점을 형성하게 된다. 그러나 Fig. 1(a)와 같이 구면수차가 존재하는 경우에는 모든 광선들에 대해 렌즈는 하나의 초점을 형성하지 않고 광축을 따라서 특정한 초점영역을 형성하게 된다. 따라서 Fig. 1(a)에 해당하는 구면렌즈의 초점은 기하학적 단일 점이 아닌 후광이 둘러싸고 있는 임의의 크기를 가지는 밝은 반점으로 나타나게 된다. 구면수차는 종구면수차(Longitudinal spherical aberration)와 횡구면수차(Transverse spherical aberration)로 구분된다. 그림에서와 같이 종구면수차는 근축 광선과 임의의 광선이 광축상에서 교차하는 점들 사이의 거리를 나타내며, 횡구면수차는 광선들이 근축 초점면(Paraxial focal plane)에서 교차하는 점들 사이의 거리를 나타낸다.

구면수차를 가지는 렌즈를 통과하는 모든 광선은 한 점이 아닌 모두 다른 점에서 상을 맺게 되며, 근축이론에서 \sin θ 로 표현할 수 있다는 가정하에서만 광축 근처의 극히 좁은 영역, 즉 근축영역을 통과하는 광선은 한 점을 중심으로 수렴하여 초점을 형성하게 된다. 커다란 상의 경우, 구면수차는 명암을 감소시키고 자세한 상을 볼 수 없게 되는 등 렌즈의 결상 기능을 저하시킨다. 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 스넬의 법칙(Snell's law)^(6,26)으로 정의되어진다. 스넬의

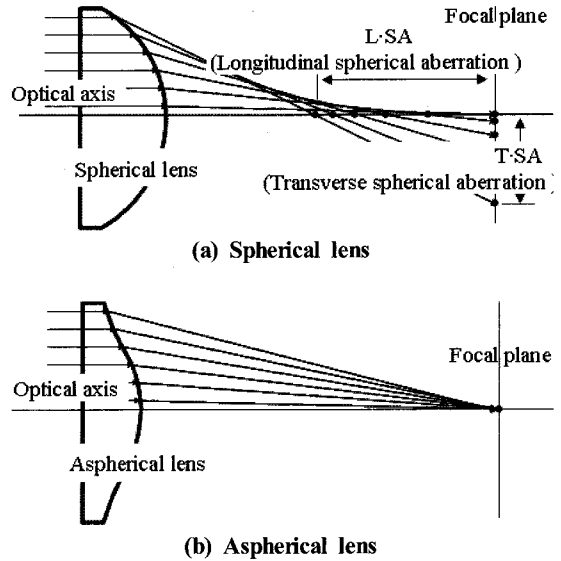


Fig. 1 Schematic illustrations of spherical aberration

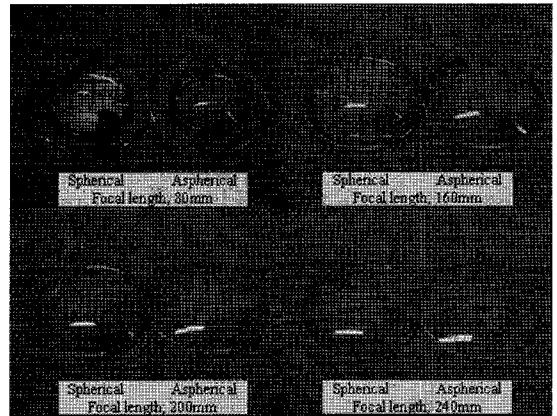


Fig. 2 Spherical lens and aberration-free spherical lens

법칙은 렌즈 면을 통과하는 광선의 입사각, 굴절각, 그리고 렌즈 재료의 굴절률로 구성된 관계식이다. 구면수차의 발생 기구에 의하면 구면수차는 구면 렌즈의 직경이 클수록 크게 나타나며, 또한 구면수차의 양은 초점의 크기에 직접적인 영향을 미치게 된다. 즉, 구면수차를 포함하는 정도는 초점의 크기에 영향을 미치게 되며, 이로 인하여 측정기나 광학장비의 선명도와 분해능 또는 해상도를 저해하는 작용을 한다. 따라서 고기능, 고품질 렌즈의 설계에 있어서 특히 결상 기능에 커다란 영향을 미치게 되는 구면수차는 필수적으로 보정 되어야 한다.

2.2 구면 수차가 제거된 비구면 렌즈

Fig. 2는 본 연구에서 설계, 제작된 각종 렌즈의 샘플이다. 본 연구에서는 CAM 프로그램을 이용하여 Fig. 2와 같이 각기 다른 초점거리를 가지는 구면 렌즈 4개와 이와 동일한 초점거리를 가지면서 구면수차를 제거한 4개의 비구면 렌즈를 설계 및 제작하였다. 초점거리는 80mm, 160mm, 200mm, 240mm이다. 렌즈 제작에 사용된 재료는 굴절률이 1.4003인 PMMA(Poly Methyl Meta Acrylate)을 사용하였다. 구면 렌즈의 직경은 100mm로 하였으나, 초점거리가 80mm인 구면 렌즈의 경우 구면 반경이 32.024mm로 기하학적으로 100mm의 직경을 가지는 렌즈를 제작할 수 없는 관계로 외부 직경은 100mm를 유지하고 렌즈로 사용될 실제 유효직경은 62mm로 하였다. 구면 렌즈와 비구면 렌즈는 모두 한쪽 면은 평면인 평면-볼록렌즈를 대상으로, 초점에서 광선을 출발시켜 볼록한 면을 통과한 후 평면을 통하여 광축과 평행한 광선으로 진행하도록 설계하였다. 평면쪽으로 입사한 평행 광선은 굴절되지 않고 광축과 나란히 진행하기 때문에 볼록면에 의해 구면수차가 발생한다. 그러므로 이 면의 구면수차를 보정하여 비구면을 형성함으로써 구면수차 보정 전후의 효과를 뚜렷하게 확인할 수 있도록 평면-볼록렌즈로 설계, 제작하였다. 그러므로 구면 수차가 발생하지 않도록 볼록한 면을 통과하는 모든 광선이 초점에 모이도록 구면을 수정하여 비구면을 형성하여 구면수차 보정 전후의 효과를 뚜렷하게 확인할 수 있도록 평면-볼록렌즈로 설계, 제작하였다.

3. 수차 측정 장치와 측정

3.1 구면 수차 측정 장치

Fig. 3은 렌즈의 결상성능을 평가하기 위한 측정 장치의 개략도이다. 전체적인 구성은 광원부, 렌즈 홀더부, 그리고 측정부로 이루어져 있다. 광원부는 측정에 사용될 평행광선을 만들고 렌즈의 광축에 평행하게 입사시킬 2축의 직선 이송과 한 축의 회전이 가능하도록 구성되어 있다. 렌즈 홀더부는 렌즈를 고정시키고 광원부와 측정부 사이에서 축의 미세한 직선 이송이 가능하며, 측정부는 렌즈를 통과한 광선을 결상 시키고 결상된 이미지의 상호 거리를 측정할 수 있도록 구성하였다.

3.1.1 광원부

광원부는 크게 레이저와 콜리메이터 그리고 레이저의 고정과 상하좌우 미세한 움직임이 가능하도록 하기 위해서 제작한 2축 스테이지로 구성되어 있다.

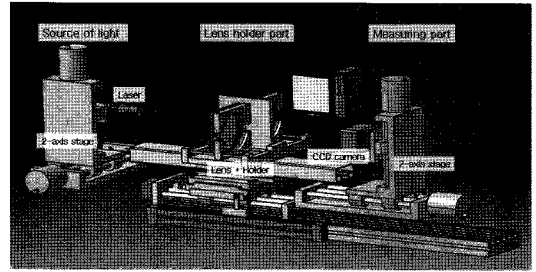


Fig. 3 System configuration for aberration measurement

레이저는 2.5mW의 출력을 가지고 있으며 레이저 빔의 크기는 0.52mm이다. 레이저의 앞부분에 콜리메이터를 연결하여 평행광선을 발생하도록 하였다. 콜리메이터는 25mm의 빔 직경을 가지고 평행광선을 출력하게 된다. 광원부에서 발생된 레이저 광은 광축, 근축영역, 그리고 비근축영역으로 3부분의 광선을 이용하게 된다. 구면 렌즈뿐만 아니라 비구면 렌즈에서 렌즈의 정확한 광축을 찾아서 그곳으로 광선을 비추기 위해서는 광원부나 렌즈 홀더부 중에서 적어도 하나는 상하좌우의 미세한 움직임이 가능해야 한다. 또한 렌즈로 입사하는 광선을 광축과 평행하도록 조정하기 위해서는 광선의 각도를 조정할 수 있도록 구성해야 한다. 이러한 조건을 충족하기 위해 2축 스테이지를 제작하고 레이저를 장착하였으며 각 축에는 마이크로미터를 장착하고 디지털 인디케이터(Indicator)를 통해 미세조정이 가능하도록 구성하였다. 레이저 광선의 각도 조절은 레이저와 콜리메이터 사이에 아답터를 설치하여 각도를 조정할 수 있도록 하였다.

3.1.2 렌즈 홀더부

렌즈 홀더부는 렌즈를 고정하고 레이저와 CCD사이를 미세하게 움직일 수 있도록 제작하였다. 렌즈는 렌즈의 직경과 동일하게 제작된 홀더에 장착된다. 이 홀더는 홀더부의 주 베이스 위에 장착된 상태로 전후 이동이 이루어진다. 주 베이스에는 스텝모터와 볼스크류(Ball-screw)를 사용하고 스케일과 인디케이터를 이용하여 이동량을 확인할 수 있도록 하였다. 볼스크류는 2mm/rev를 이용하여 미세한 위치제거가 가능하도록 구성하였다.

3.1.3 측정부

측정부는 렌즈를 통과해서 나온 광선을 결상 시키는 스크린의 기능을 가지면서 결상된 광선의 상대적인 위치를 검출하는 기능을 가진다. 스크린의 기능과 결상된 광선의 모니터링 및 측정을 위해서 CCD카메라를 이용하였다. 카메라

렌즈가 가질 수 있는 수차의 영향을 없애기 위해서 CCD 카메라는 앞부분의 렌즈를 제거하고 카메라 내부의 CCD소자에 직접 상이 맺히게 하였다. CCD 소자에 결상된 광선은 컴퓨터의 모니터로 확인할 수 있다. 모니터를 통해 확인된 영상의 저장과 결상된 이미지 점들 상호간의 위치는 Media Cybernetics사의 QCapture Pro라 불리는 소프트웨어를 이용하여 측정하였다. 본 연구에 사용된 렌즈의 직경은 동일하므로 측정할 렌즈의 중심과 CCD카메라의 중심을 일치하게 고정하면 카메라의 상하 움직임은 필요 없다. 또한 렌즈 홀더부가 약 200mm의 움직임이 가능하므로 CCD의 전후 움직임이 불필요하다. 그러나 렌즈의 크기가 달라질 경우 렌즈 광축의 높이가 달라진다. 렌즈 홀더부가 어느 정도의 움직임을 가지고 있으나 CCD를 고정 시킬 경우 고정된 CCD에서 렌즈까지 거리와 비교해서 초점거리가 짧거나 긴 렌즈의 경우 측정이 어려워진다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 CCD카메라를 이동식 2축 스테이지를 이용하여 고정하였다.

3.2 구면 수차 측정

Fig. 4는 구면 수차를 측정하기 측정장치의 사진이다. 렌즈의 결상능을 측정하기 위해 각 렌즈의 광축, 근축영역, 비근축영역으로 광선을 통과시켜 결상상태를 확인하였다. 일반적으로 근축영역이라 함은 렌즈의 광축에 근접한 영역을 말하는 것으로 정확히 광축으로부터 몇mm 이내의 영역이라 특정되어 있지는 않다. 본 연구에서는 제작된 렌즈의 크기를 감안하여 광축으로부터 5mm 이내의 부분을 근축영역이라 가정하고 실험을 진행하였다. 콜리메이터는 25mm 직경의 광선을 출력시키기 때문에 동판에 광축을 중심으로 5mm 간격으로 0.3mm의 핀홀을 만들고 콜리메이터의 앞부분에 부착하여 실험을 진행하였다. 콜리메이터 캡으로 인해서 일정한 간격의 빔과 원하는 위치의 빔을 선택적으로 사용할 수 있다.

측정은 광축에 위치한 핀홀과 근축영역(5mm)에서 가로 위치의 핀홀 1개와 비근축영역에서 세로축의 15mm 위치한 핀홀 1개를 통해 레이저 평행광선을 입사 시킨 후에 영상을 획득하였다. 단, 초점거리가 80mm인 렌즈의 경우에만은 렌즈의 크기로 인하여 세로축의 10mm 위치에 있는 핀홀을 선택하였다. 영상은 렌즈가 CCD 카메라에 가까워질 때 (+), 멀어질 때 (-)로 방향으로 설정하고 10mm 까지는 1mm 간격으로, 이후에는 2mm 간격으로 영상을 획득 하였다. 기준점의 위치는 비근축 광선과 광축을 지나는 광선이 만나는 위치를 0로 설정하였다.

Fig. 5(a), (b), (c), (d)은 초점거리가 80mm, 160mm, 200mm, 240mm인 구면 렌즈와 비구면 렌즈를 측정한 영상

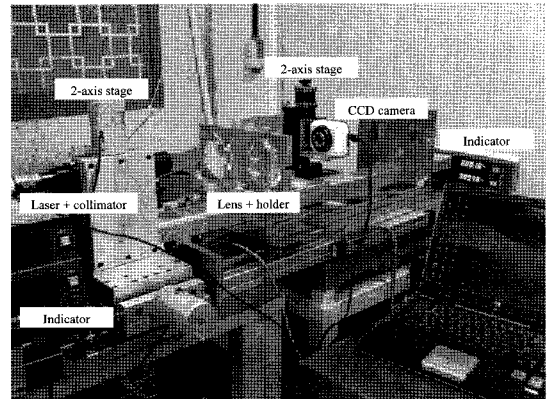


Fig. 4 Experimental setup for aberration measurement

이다. 기준위치를 중심으로 +7mm의 위치에서 -7mm의 위치로 렌즈를 이동할 때 비근축 광선은 광축 광선을 지나 처음의 위치와 대칭의 위치로 이동한다. 그러나 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)의 구면 렌즈에서 근축광선의 경우 광축광선에 근접하고 있으나 -7mm의 위치에서도 광축과 완전히 일치하지 않고 있으며, Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)의 구면 렌즈에서는 -6mm과 -5mm 부근에서 광축광선과 비근축광선이 교차하는 것으로 나타난다. 이는 구면 렌즈가 어떠한 위치로 움직이더라도 3개의 광선이 한 점에서 만나는 위치가 존재하지 않는다는 것을 의미한다.

Fig. 5에서 비구면 렌즈의 경우, 렌즈를 기준위치를 중심으로 +7mm의 위치에서 -7mm의 위치로 이동할 때 비근축 광선은 구면 렌즈의 영상과 동일하게 서로 대칭의 위치로 이동한다. 그러나 구면 렌즈와 다른 점은 움직임 거리의 양은 차이는 보이지만 근축광선 역시 서로 대칭의 위치로 이동한다는 것이다. 즉, 기준 점 위치에 가까워질수록 3개의 점들이 광축에서 모이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에서 초점거리가 짧아질수록 광축을 중심으로 핀홀에 의한 상의 움직임이 커지는 경향을 보이고 있다. 특히 렌즈의 광축에서 멀리 있는 핀홀의 상이 가까이 있는 상보다 많이 움직임을 보이고 있다.

Fig. 6은 앞에서 획득한 영상을 이용하여 이미지 점들의 거리를 측정한 그래프이다. 그래프에서 거리는 광축상의 상을 기준으로 근축영역과 비근축 영역을 통과하여 형성된 상과의 거리를 측정하였다. 비구면 렌즈의 경우 상기의 영상 이미지와 동일하게 렌즈의 기준 위치에서 두 이미지 점이 교차하고 있다. Fig. 6(b)에서 구면 렌즈는 비근축 광선이 광축과 교차하는 기준점(0)에 위치할 때 근축광선은 광축과 약

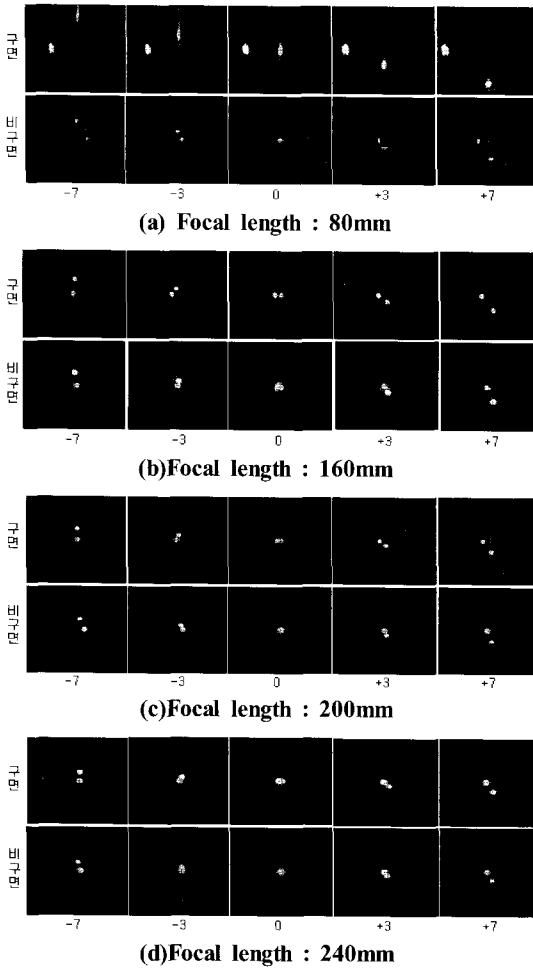


Fig. 5 Spot images on the focal plane according to focal length

0.3mm 정도 벗어나 있음을 확인하였다. 근축광선이 만든 이미지 점이 광축과 교차할 때 비근축광선에 의한 이미지 점은 광축과 약 1.1mm정도 벗어나 있었다. 즉, 근축광선과 광축이 만나는 위치를 초점이라 할 때, 초점 면에 비근축광선에 의해 형성된 점과의 거리가 Fig. 1에서 보는 바와 같이 횡구면 수차의 크기이다. 동일한 그래프에서 비근축광선은 렌즈가 0의 위치에서 광축과 교차하고 있고 근축광선은 렌즈가 약 10mm의 위치로 이동했을 때 광축과 교차하고 있다. 종구면 수차는 Fig. 1과 같이 렌즈의 비근축광선이 광축과 만나는 점과 초점까지의 거리이다. 따라서 Fig. 6(b)의 그래프에서 종구면 수차의 크기는 렌즈가 약 10mm의 위치에

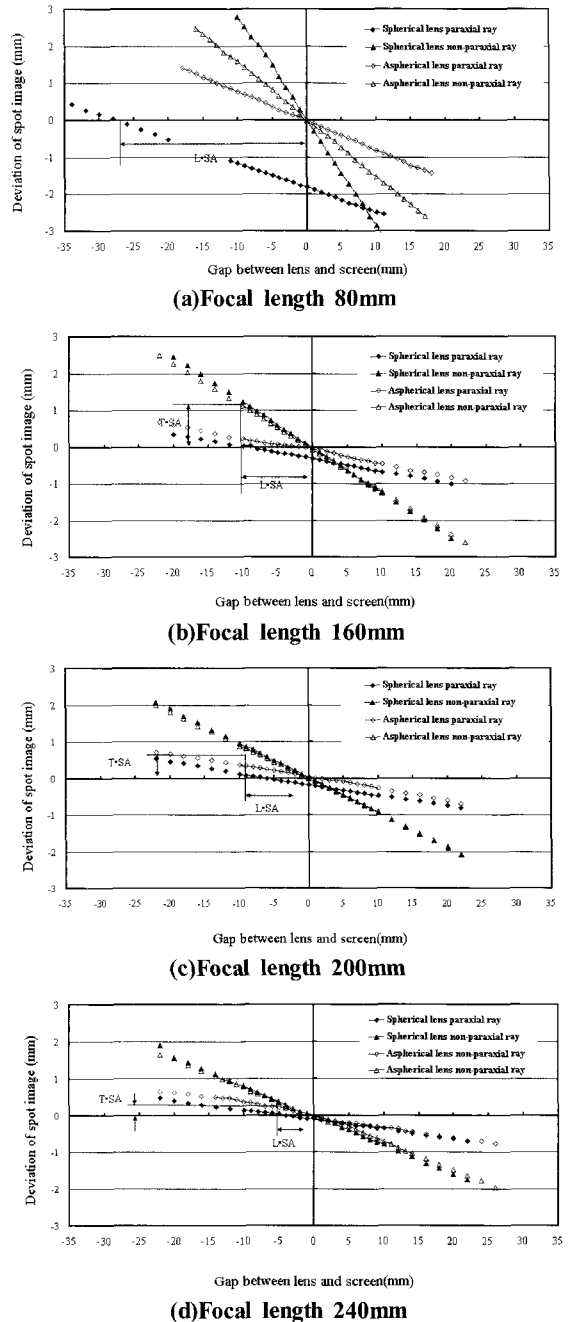


Fig. 6 Deviation of spot image by gap of lens and screen

있을 때 원점과의 거리이다. 그러나 비구면 렌즈의 경우 모든 편향에 의한 상들이 기준점 0의 위치에서 교차하고 있어 구면수차가 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 6(b), (c)와 (d)에서 렌즈의 초점 거리가 커지면 구면 수차는 작아지는 것을 확인할 수 있다. 초점거리가 240mm에서 160mm으로 짧아지면 구면수차는 그래프에서와 같이 2배정도의 차이를 보인다. 이는 렌즈의 크기가 동일하더라도 렌즈가 가지는 초점거리가 달라지면 수차의 크기가 달라짐을 의미한다. 초점거리의 변화는 구면 렌즈에서 렌즈의 곡률반경의 변화를 가져오는 것이므로 곡률반경이 작을수록 즉, 초점거리가 짧은 렌즈일수록 구면수차의 영향을 많이 받는다. 구면수차는 입사각의 영향을 받으므로 동일한 곡률을 가질 때 렌즈가 커질수록 구면수차는 커지는 것으로 알려져 있다. 따라서 Fig. 6(a)의 초점거리 80mm의 렌즈에서는 비근축광선의 위치를 다른 광선에 비해 광축에 가깝게 설정하였으므로 수차가 160mm의 초점거리를 가지는 렌즈와 비교할 때 수차의 증가 폭이 비슷하게 나올 것으로 예상하였으나 급격한 증가를 나타내고 있다. 초점거리가 160~240mm까지는 수차가 완만한 곡선을 가지는데 비해서 80mm의 초점거리를 가지는 렌즈의 구면수차는 급격한 증가를 보이고 있다. 이러한 결과는 구면수차의 영향이 렌즈의 크기보다는 렌즈의 초점거리에 의해서 구면수차의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 구면수차의 발생 원인을 역으로 이용하여 구면 수차가 제거된 비구면 렌즈를 설계 및 제작하였다. 제작된 렌즈의 구면수차를 정성적, 정량적으로 측정할 수 있도록 수차측정 장치를 개발하였으며, 이 장비를 이용하여 제작된 구면 비구면 렌즈의 수차를 측정 비교함으로써 설계 방법의 타당성을 검증하고 구면, 비구면 렌즈의 광학적 특성을 비교하기 위해 실험이 진행되었다.

본 논문의 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 렌즈의 직경이나 초점거리와는 무관하게, 설계된 초점거리에서 렌즈를 통과한 모든 광선이 한 점에 모이도록 구면수차가 완전히 제거된 비구면 렌즈의 설계가 가능하다.
- (2) 광학 렌즈의 성능 평가 방법으로 결상성능을 측정, 평가하는 방법의 적용을 제안하였으며, 동 방식에 의해서는 광학특성의 정량적 계량이 가능하다.

참고 문헌

- (1) Suzuki, H., Kodera, S., Maekawa, S., Morita,

- N., Sakurai, E., Takeda, H., Kuriyagawa, T., and Syoji, K., 1998, "Study on Precision grinding of micro aspherical surface," *Journal of the Japan society for precision engineering*, Vol. 64, No. 4, pp. 619~623.
- (2) Antonov, E. D. A. and Burdina, N. M., 1990, "Manufacture of optical elements by molding methods," *Sol. J. Opt. Techol.*, Vol. 57, pp. 672~679.
- (3) Othaki, S., 1999, "The Applications of a Liquid Crystal Panel for the 15Gbyte Optical Disk Systems," *Jpn. J. Appl.* Vol. 38, pp. 1744~1749.
- (4) Park, H., 2004, "A solution for NURBS modeling in aspheric lens manufacture," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 23, No. 1~2, pp. 1~10.
- (5) Visser, D., Gijsbers, T. G. and Jorna, R. A. M., 1985, "Molds and measurements for replicated aspheric lenses for optical recording," *Applied Optics*, Vol. 24, pp. 1848~1852.
- (6) Hecht, Eugene, 1998, *Optics*, Addison-Wesley Pub. Co., 3rd ed.
- (7) Song, T. S., Lee, M. D., Jun, H. G., Park, N. C. and Park, Y. P., 2001, "Technical Trend of Optical Information Storage Device," *J. of the KSPE*, Vol. 18, No. 4, pp. 25~36.
- (8) Booth, M. J. and Wilson, T., 2000, "Strategies for the compensation of specimen-induced spherical aberration in confocal microscopy of skin," *Journal of microscopy*, Vol. 200, Pt 1, pp. 68~74.
- (9) Hell, S. W., Reiner, G., Cremer, C. and Stelzer, E. H. K., 1993, "Aberrations in confocal fluorescence microscopy induced by mismatches in refractive index," *Journal of microscopy*, Vol. 169, pp. 391~405.
- (10) Török, P., Hewlett, S. J. and Varga, P., 1997, "The role of specimen induced spherical aberration in confocal microscopy," *Journal of microscopy*, Vol. 187, pp. 158~172.
- (11) Möller, K. D., 1988, *Optics*, University Science Books, pp. 1-73, 434~464.