

# 열전대를 이용한 광학렌즈의 구면수차와 집광성능 측정

김한섭\*, 박규열†

(논문접수일 2007. 6. 26, 심사완료일 2007. 8. 21)

## Measurement of Spherical Aberration and Light Concentrating Efficiency of Lens by Using Thermocouple

Hanseob Kim\*, Kyuyeol Park†

### Abstract

In this paper, spherical aberration and light concentrating efficiency of lens was measured. The measuring system is applying spherical aberration occurrence principal and could measure a temperature at focal plane by using the thermocouple. The sun which is located in infinite distance and could makes parallel ray is used as a illuminant or heat source in experiments. It is confirmed that light concentrating efficiency of optical lens is in inverse proportion to spherical aberration and.

**Key Words** : Spherical lens(구면렌즈), Aspherical lens(비구면렌즈), Spherical aberration(구면수차), Thermocouple(열전대), Light Concentrating efficiency(집광성능)

## 1. 서론

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 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<sup>(1-3)</sup>. 따라서 광학계의 성능을 향상시키기 위하여 이들 수차의 영향을 제거하거나 경감시키기 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있다<sup>(4,5)</sup>.

비구면 렌즈는 특히 구면수차(Spherical aberration)의 제거가 가능하며, 초점의 집광성능을 향상시킬 수 있는 동시에 복잡한 렌즈 조합을 필요로 하지 않기 때문에 높은 투과율이

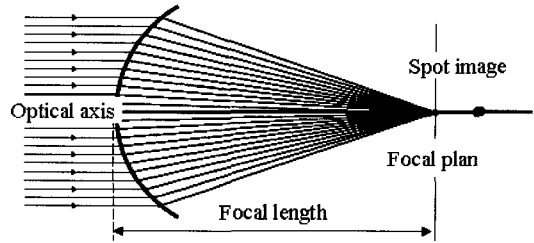
\* 울산대학교 기계자동차공학부 (hanseob@ulsan.ac.kr)  
주소: 680-749 울산시 남구 무거동 산29  
+ 울산대학교 기계자동차공학부

얻어지는 등의 많은 장점을 가지고 있는 반면, 설계 및 제작 상에는 큰 어려움을 가지게 된다. 따라서 관용적으로는 오랜 기간의 경험에 의해서 근사해가 제시되어 있는 구면 렌즈의 사용이 선호되어 왔다<sup>(6,7)</sup>. 이러한 구면 렌즈의 사용을 위해서는 반드시 수차의 영향을 측정 및 분석하는 과정이 선행되어야 한다. 또한 특정 수차가 광학계의 품질에 현저하게 영향을 미치는 경우에는 다른 수차는 무시하고 특정의 수차를 보정할 수 있는 설계방안이 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. 이와 같은 배경을 토대로, 본 연구에서는 렌즈의 설계 생산성 향상을 목적과 수차의 측정을 위하여 새로운 측정방법을 제안하고 이를 통해 구면 렌즈와 비구면 렌즈의 집광성능을 측정 분석하는 실험을 진행하였다.

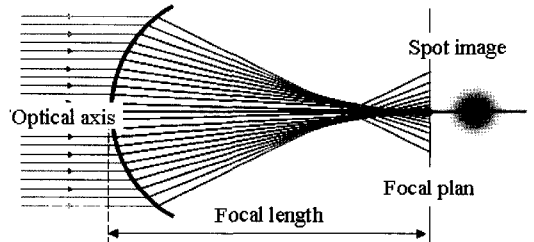
## 2. 구면수차의 영향과 종류

구면수차는 광축에 대해서 평행으로 들어온 빛이 렌즈의 중심부를 통과했을 때와 바깥쪽을 통과했을 때 그 구면 렌즈가 가지는 기하학적 형상으로 인하여 굴절각이 다르게 되고 그 결과 렌즈의 중심부와 가장자리를 통과하는 빛이 한 점에 초점을 형성하지 못하고 넓은 영역으로 빛이 퍼지게 되는 결함이다. 구면수차는 렌즈의 선명도나 분해능 등의 결상성능을 저해하고 있다. 렌즈가 크고 초점거리가 짧을수록 구면수차의 영향은 커지게 되며, 구면수차는 여러 가지 수차 중에서 렌즈의 광학적 성능에 가장 큰 영향을 주는 수차이다.

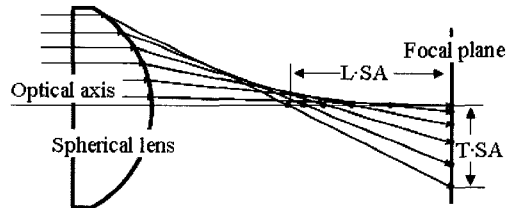
Fig. 1은 광학렌즈의 기본적인 형태에 해당하는 구면 렌즈에 있어서 구면수차의 발생원인, 영향 및 종류를 나타낸다. 구면수차가 존재하지 않을 경우에는 광축(Optical axis)에 평행하게 입사하는 광선들은 렌즈의 초점면에 하나의 초점을 형성하게 된다. 그러나 구면수차가 존재하는 경우에는 모든 광선들에 대해 렌즈는 하나의 초점을 형성하지 않고 광축을 따라서 특정한 초점영역을 형성하게 된다. 따라서 Fig. 1 (b)에 나타낸 바와 같이, 초점은 기하학적 단일 점이 아닌 후광이 둘러싸고 있는 임의의 크기를 가지는 밝은 반점으로 나타나게 된다. Fig. 1 (c)는 구면수차의 종류를 나타내며, 종구면수차 (Longitudinal spherical aberration)와 횡구면수차(Transverse spherical aberration)로 구분된다. 그림에서와 같이 종구면수차는 근축 광선과 임의 광선이 광축상에



(a) Spherical lens without spherical aberration



(b) Spherical lens with spherical



(c) Longitudinal spherical aberration(L-SA) and transverse spherical aberration(T-SA)

Fig. 1 Schematic illustrations of spherical aberration

서 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  $\sin\theta \approx \theta$ 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 되

는데 기인하는 현상이다. 이때의 입사각과 굴절각의 관계는 스넬의 법칙(Snell's law)<sup>(1,8)</sup>으로 정의되어진다. 스넬의 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 측정기구나 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.

### 3. 측정 장치 및 실험

#### 3.1 실험 장치

태양광은 지구로부터 무한 거리에 광원이 위치하여 평행 광선이라 가정할 수 있으며 풍부한 에너지를 가지고 있어 비교할 렌즈의 집광능력의 차이를 평가하기에 적당하다. 그러나 대기의 조건에 따라서 태양광의 양과 질이 차이되며 인위적으로 이러한 것들을 조절하기가 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 비교할 두 렌즈를 동일한 조건에서 측정하고 평가하기 위해서 측정 장치에 두 개의 렌즈를 동시에 장착할 필요가 있다. Fig. 2는 렌즈의 집광능력을 평가하기 위한 실험 장치이다. 그림에서와 같이 두 개의 렌즈 홀더를 제작하여 두 개의 렌즈를 동시에 장착할 수 있도록 하였다. 렌즈 홀더는 볼부쉬를 이용하여 전후로 움직일 수 있도록 하였다. 렌즈홀더를 이동하여 스크린 또는 CCD카메라에 정확히 초점을 형성할 수 있으며 홀더 아래 부분에서 볼트를 이용하여 실험 중에 초점의 변화가 없도록 고정 장치를 마련하였다. 두 개의 렌즈홀더는 Fig. 2에서와 같이 베이스 플레이트에 위에서 움직이게 되어 있으며 베이스 플레이트는 가

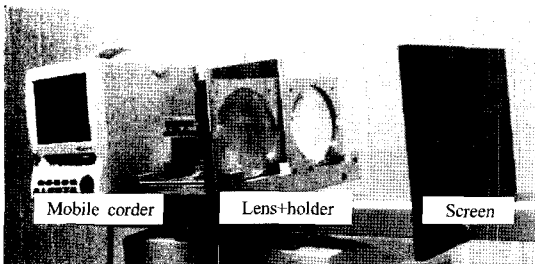


Fig. 2 Experimental setup for light concentrating test

이드를 따라 움직이게 되어 있다. 렌즈 홀더의 이동거리는 약 200mm 정도 인데 이는 본 논문에서 사용한 렌즈의 초점거리가 80~240mm인 점을 감안하여 각각의 렌즈홀더가 움직이는 거리를 정하였다. 스크린은 베이클라이트(Bakelite)를 이용하여 제작하였으며 가이드에 수직으로 장착되고 고정할 수 있도록 되어있다. 각 렌즈의 집광성능은 렌즈를 광선을 집광시키고 이때 초점에서의 온도를 측정함으로써 각 렌즈의 집광성능을 확인하게 된다. 온도측정 부분은 스크린 위에서 대기의 온도를 측정할 곳과 렌즈를 통해 맺혀진 두 곳의 초점 부분이다. 세 곳의 온도를 측정하기 위해 3개의 K타입 열전대(Thermocouple)을 설치하였다. 열전대는 휴대용 측정기인 모바일 코드에 연결하고 실험중의 온도를 기록하도록 구성하였다.

#### 3.2 구면 수차가 제거된 비구면 렌즈

Fig. 3은 본 논문에서 사용하기 위해 설계, 제작된 각종 렌즈의 샘플이다. 본 연구에서는 자체적으로 개발한 비구면 렌즈 설계용 CAM 프로그램을 이용하여 Fig. 3과 같이 각기 다른 초점거리를 가지는 구면 렌즈 4개와 이와 동일한 초점 거리를 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)를 사용하였다. 구면 렌즈의 직경은 100mm로 하였으나, 초점거리가 80mm인 구면 렌즈의 경우 구면 반경이 32.024mm로 기하학적으로 100mm의 직경을 가지는 렌즈를 제작할 수 없는 관계로 외부직경은 100mm를 유지하고 렌즈로 사용될 실제 유효직경은 62mm로 하였다. 구면 렌즈와 비구면 렌즈는 모두 한쪽 면은 평면인 평면-볼록렌즈를 대상으로, 초점에서 광선을 출

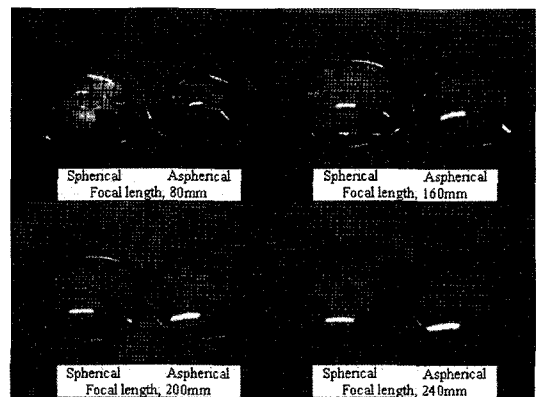


Fig. 3 Spherical lens and aberration-free aspherical lens

발시켜 볼록한 면을 통과한 후 평면을 통하여 광축과 평행한 광선으로 진행하도록 설계하였다. 구면 수차에 의한 집광성능을 정확하게 측정하고 비교 평가하기 위해 집광성능에 영향을 줄 수 있는 요소를 최소화시키고자 평면-볼록렌즈를 대상으로 선정하였다. 평면쪽으로 입사한 평행광선은 굴절되지 않고 광축과 나란히 진행하기 때문에 볼록면에 의해 구면 수차가 발생한다. 그러므로 이 면의 구면수차를 보정하여 비구면을 형성함으로써 구면수차 보정 전후의 효과를 뚜렷하게 확인할 수 있도록 평면-볼록렌즈로 설계, 제작하였다.

### 3.3 구면 렌즈와 비구면 렌즈의 집광성능

렌즈의 집광성능을 평가하기 위해 실험장치에 초점거리별로 구면 렌즈와 비구면 렌즈를 장착하였다. Fig. 4와 같이 실험장치를 태양과 일직선이 되게 설치하고 각각의 렌즈를 움직여 스크린 위에 초점을 맞추고 실험을 진행하였다.

Fig. 5는 렌즈의 초점 거리에 따른 구면 렌즈와 비구면 렌즈의 집광성능을 나타낸 그래프이다. 실험에서 온도는 구면 렌즈와 비구면 렌즈의 초점에서 온도와 동일한 조건에서 대

기의 온도를 측정하였다.

그래프에 나타난 바와 같이 실험 시작 후 각 렌즈 초점부의 온도는 급격히 상승하여 최고 온도에 도달한 뒤 점차 온도가 낮아지기 시작한다. 이것은 실험 시작시점에 태양광에

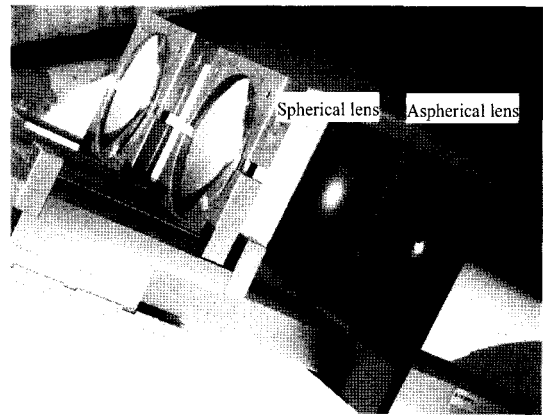
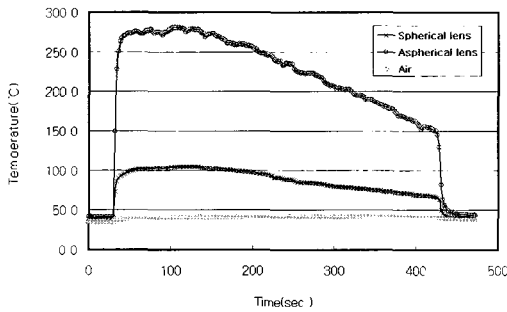
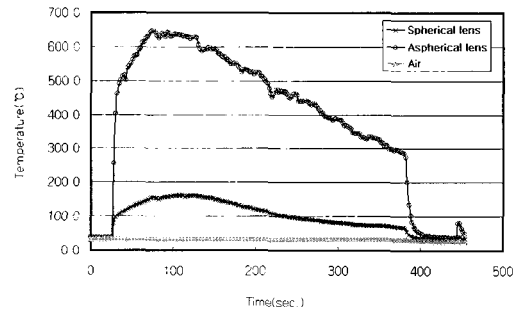


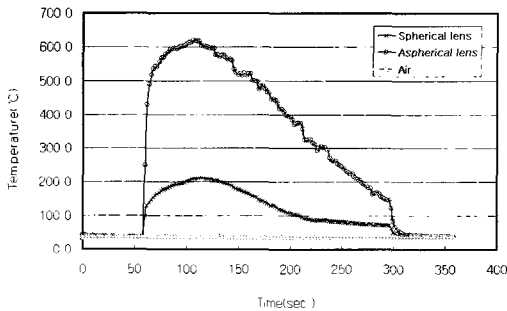
Fig. 4 View of light concentrating experiment



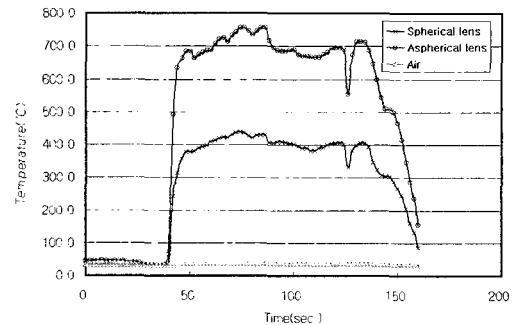
(a) Focal length 80mm



(b) Focal length 160mm



(c) Focal length 200mm



(d) Focal length 240mm

Fig. 5 Difference of temperature at focal point according to lens type

의한 렌즈의 초점이 열전대 부근에 셋팅되어 있어 온도가 상승하고 있으며 이후 태양의 이치 변화에 의해 초점의 위치가 열전대를 벗어남으로 해서 온도가 낮아지고 있다.

Fig. 5 (a)는 초점거리가 80mm인 렌즈이며 비구면 렌즈에 의해 최고 280 °C 정도까지 온도 상승이 일어났다. 이에 반해 구면 렌즈의 경우는 105°C 정도의 온도까지 상승하였다. 비구면 렌즈가 구면 렌즈에 비해 약 3배 정도 높게 온도가 상승하였다.

Fig. 5 (b), (c), (d)는 초점거리가 각각 160mm, 200mm, 240mm 인 렌즈의 실험 결과이다. 비구면 렌즈는 순서대로 640°C 620°C 760°C 정도에서 최고 온도를 보이고 있으며, 구면 렌즈는 160°C 210°C 440°C 정도의 최고 온도를 나타내고 있다. 즉, 렌즈에 따라서 차이를 보이고 있지만 초점거리가 160mm, 200mm, 240mm인 비구면 렌즈가 구면 렌즈에 비해서 400%, 295%, 173% 정도 집광성능이 뛰어난 것으로 확인되었다.

실험에 사용된 비구면 렌즈는 구면수차를 모두 제거한 렌즈이므로 Fig. 5 (b), (c), (d)에서와 같이 직경이 동일한 비구면 렌즈에서는 모두 비슷한 최고 온도를 보이게 된다. 구면 렌즈의 경우는 크기가 동일하더라도 구면수차의 크기에 따라 최고 온도는 달라진다.

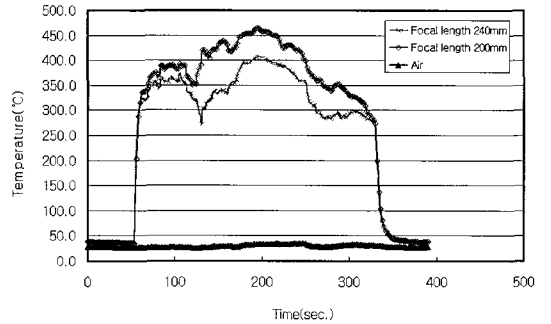
본 집광성능 실험에서 초점거리가 짧은 렌즈일수록 구면수차를 제거한 효과가 크게 나타나고 있으며 이는 구면 렌즈가 가지고 있는 구면수차의 양이 초점거리가 짧을수록 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에서 집광실험 시에 구면 렌즈와 비구면 렌즈에 의해 스크린에 결상된 초점의 형상을 확인할 수 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 구면 수차가 존재하지 않는 비구면 렌즈의 초점면은 중앙의 초점만이 보이고 있지만 구면 수차가 존재하는 구면 렌즈의 경우는 초점 주위에 넓은 부분에 걸쳐 밝은 후광을 발견할 수 있다. 이는 렌즈가 가지는 광학적인 특성으로 구면 수차의 존재를 의미하는 것이며 구면수차로 인하여 렌즈를 통과한 광선이 모두 온도를 상승시키는 열원으로 작용하는 것이 아니라 초점 주위에 넓게 분포하고 있어 비구면 렌즈에 비해 초점에서의 최고 온도가 상대적으로 낮을 수밖에 없음을 보여주고 있다.

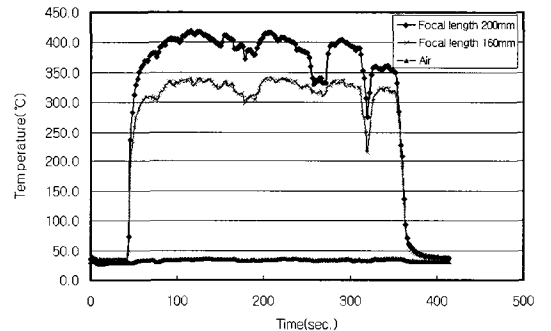
**3.4 초점거리에 따른 구면 렌즈의 집광성능**

일반적으로 렌즈의 초점거리와 직경에 따라 렌즈가 가지는 구면 수차는 차이를 나타내고 있다. 따라서 구면 수차의 크기에 따른 렌즈의 집광성능을 측정하기 위하여 수차를 가지고 있는 구면 렌즈의 초점거리에 따른 집광성능을 측정하

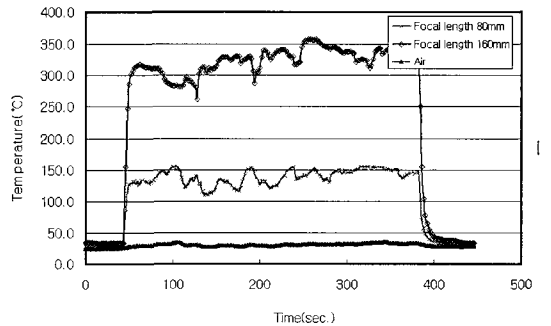
였다. Fig. 6 (a), (b), (c)는 초점거리에 따른 구면 렌즈의 집광성능을 나타내고 있다. Fig. 6은 동일한 대기 조건에서 구면수차의 영향에 따라 구면 렌즈의 집광성능의 차이를 알아보고자 앞 절에서 언급한 것과 같이 초점거리가 다른 두개의 구면 렌즈를 실험 장치에 설치하고 실험을 진행하였다.



(a) Focal length 240mm, 200mm



(b) Focal length 200mm, 160mm



(c) Focal length 160mm, 80mm

**Fig. 6** Difference of temperature according to focal point in spherical lens

Fig. 6의 각 그래프에서 온도 차이는 약 60°C 80°C 200°C의 최고 온도 차이를 보이며 있다. 이는 구면 렌즈에서 초점거리가 짧아질수록 12.9%, 19.4%, 56.0% 정도 집광성능이 약화되고 있음을 보여준다. 본 논문에서 사용한 렌즈의 초점거리는 일정하게 40mm의 차이를 보이고 있으나 실험 결과는 초점거리가 짧아질수록 구면 렌즈의 구면수차가 급격하게 증가함을 판단할 수 있으며 이에 따라 렌즈의 집광성능 또한 급격하게 감소함을 확인하였다.

구면 렌즈와 비구면 렌즈의 집광성능 비교와 초점거리에 따른 구면 렌즈의 집광성능 비교에서 구면 렌즈의 집광성능은 초점거리에 가장 큰 영향을 받고 있으나 비구면 렌즈의 경우에는 초점거리에는 비교적 영향을 덜 받고 있으며 렌즈의 직경에 따라서 최고 온도가 바뀌게 되며 이는 렌즈가 클수록 렌즈를 지나는 빛의 양이 증가함으로써 렌즈를 통과 최고 온도가 상승함을 추측할 수 있다. 또한 구면 렌즈의 경우에는 Fig. 6과 같이 초점거리가 짧아질수록 구면수차의 영향을 많이 받게 되고 이에 따라서 집광성능도 급격히 저하되고 있다.

#### 4. 결론 및 평가

본 논문에서는 자체적으로 설계 및 제작한 구면, 비구면 렌즈의 집광성능을 측정하고 비교함으로써 구면 비구면 렌즈의 광학적 특성을 비교하였다. 광학 렌즈의 특성평가를 위하여 무한 광원을 열원으로 이용하여 집광성능을 조사하는 방법은 현재까지 보고된 적이 없는 전혀 새로운 시도라고 평가 할 수 있다. 무한광원을 열원으로 이용하여 집광성능을 통한 구면수차 영향의 측정법이 측정결과를 정량적으로 계량, 평가할 수 있다는 점을 고려하면, 추후 광학렌즈의 성능 평가 방법으로 널리 활용 가능한 것으로 판단된다.

본 연구의 결론을 정리하면 아래와 같다.

- (1) 광학 렌즈의 성능 평가 방법으로 무한광원을 열원으로 이용하여 집광성능을 측정, 평가하는 방법의 적용을 제

안하였으며, 동 방식에 의해서는 광학특성의 정량적 계량이 가능하다.

- (2) 구경이 동일한 구면 렌즈의 경우에는 초점거리가 짧아질수록 집광성능이 현저히 저하되는 반면, 비구면 렌즈는 초점거리와는 무관하게 비교적 일정한 집광성능을 가진다.

#### 참고 문헌

- (1) Hecht, E., 1998, *Optics*, Addison-Wesley Pub. Co., 3rd ed.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Lee, J. S., Saeki, M., Kuriyagawa, T. and Syoji, K., 2001, "A Study on the Mirror Grinding for Mold of a Small Aspherical Lens," *J. of the KSPE*, Vol. 18, No. 12, pp. 82~87.
- (7) Lee, J. S., Syoji, K., 2002, "A Study on the Ultra Precision Machining for Aspherical Surface of Optical Parts," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 10, pp. 195~201.
- (8) Möller, K. D., 1988, *Optics*, University Science Books, pp. 1~73, 434~464.