회절상의 전산시늉을 통한 광학설계의 성능평가[1)]

Performance Evaluation of Optical Design Based on the Aerial Image Simulation

이종웅
청주대학교 정보기술공학부
julee@cju.ac.kr

광학계를 설계 과정에는 spot diagram analysis, 광선수차분석, 파면수차분석, 해상력 평가 등 설계 단계 별로 다양한 평가법이 사용되고 있다. 수차에 의한 설계평가는 작은 계산량으로 광학계의 현황을 체계적으로 평가할 수 있는 장점이 있는 반변에, 회절과 Vignetting의 영향이 고려되지 못하는 문제점이 있다. 이 때문에 optical transfer function(OTF), modulation transfer function (MTF)등의 공간주파수 영역의 전달함수를 기준으로 결상특성을 평가하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다[1,2]. 이러한 OTF와 MTF는 주어진 공간주파수를 가진 주기적 물체의 결상특성은 잘 내타내고 있으나, 실제 다양한 형태의 물체가 어떻게 결상하는가에 대한 직접적인 답을 주는 것은 아니다. 주어진 물체가 광학계에 의하여 결상될 때 상면에서의 강도분포(aerial image)를 볼 수 있다면, 이 방법이 가장 직접적이고 가시적인 평가방법이 될 수 있을 것이다. 이 연구에서는 광학설계 data로부터 OTF를 계산하고, 이를 이용하여 비가간섭성 조명에서 1차원, 2차원 물체의 회절상을 계산하여 광학계의 결상특성을 가시적으로 평가할 수 있는 program을 개발하였다.

이 program에서 회절상을 계산하는 과정은 다음과 같다.

Step. 1. 유한광선추적을 통하여 파면수차와 Vignetting을 계산하고, 동함수의 auto-correlation을 통하여 단색 OTF를 구한다[3].

Step 2. 광원의 spectrum으로부터 파장 λ_k에 대한 적절한 가중치 w_k를 선택하여 단색 OTF를 적분하여 백색광 또는 유한한 선폭을 가진 광원에 대한 다색 OTF(polychromatic OTF)를 구한다.

Step 3. 물체의 spectrum과 polychromatic OTF를 곱하여 상의 spectrum을 얻는다.

Step 4. 상의 spectrum을 Fourier 역변환[4]하여 상의 강도분포를 얻는다.

개발한 program의 계산정밀도는 그림 1의 투사광학계(F/4, EFL=76.2mm, FOV=20°)에서 spot diagram, 파면수차의 Zernike 계수, wavefront map, 단색 OTF와 point spread function(PSF)를 계산하여 Code V와 비교, 검증하였으며, 계산결과가 서로 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 그림 2는 투사광학계의 최대시야에서 spot diagram이며, 그림 3은 Code V와 새로 개발된 program에서 계산된 PSF를 보여주고 있다. 그림 4은 공간주파수 20 line-pair/mm인 three-bar pattern의 회절상을 파장 486nm, 587nm, 656 nm에서 계산하고, 이를 1:2:1로 가중평균한 다색 회절상이 나타나있다. 그림 4(a)의 radial

1) 이 연구는 산업자원부가 시행하는 부품소재 기술개발사업으로 수행된 것임

pattern의 polychromatic MTF는 0.25(Code V에서는 0.27)이며, 회절상의 계산결과에 의하면 contrast가 좋지는 않으나 pattern이 충분하게 식별됨을 보여주고 있다. 그림 4(b)는 tangential pattern의 회절상이며, tangential 방향의 다색 MTF는 0.39(Code V에서는 0.40)이며, radial pattern 보다 tangential pattern이 잘 식별됨을 바로 알 수 있다.

이 연구에서 개발된 image simulation program는 투사광학계에서 Code V와 파면수차, MTF, PSF를 비교하여 계산정밀도를 검증하였으며, 잘 일치함을 확인 할 수 있었다. Three-bar pattern의 회절상 계산에서는 MTF와 잘 일치하는 결과를 보여 주었으며, 수차와 회절에 의한 상번짐을 가시적으로 확인할 수 있었다. 이 program을 통하여 광학설계의 결상성능을 직접적이고 가시적으로 파악할 수 있으므로, 최종적인 설계평가와 성능검증에 매우 유용할 것으로 생각된다.

참고문헌

[1] 이종웅, 홍경희, 광학설계제원으로부터의 OTF 수치계산, 한국광학회지 4권 4호, 1993, pp.381-389.
[2] 김형수, 전영세, 이종웅, 김성호, "주기적인 선물체에 대한 Contrast Transfer Function의 수치계산", 한국광학회지 9권 6호, 1998, pp.396-402.
[3] Born and Wolf, Principle of Optics, Pergarmon Press, NewYork(1975), pp.464-468.
[4] E. Oran Brigham, The Fast Fourier Transnsform and its Applications, Prentice-Hall Inc., London(1988), pp.79-87.

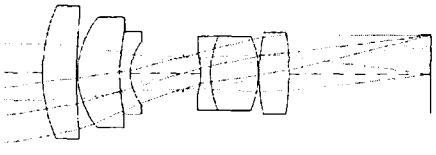
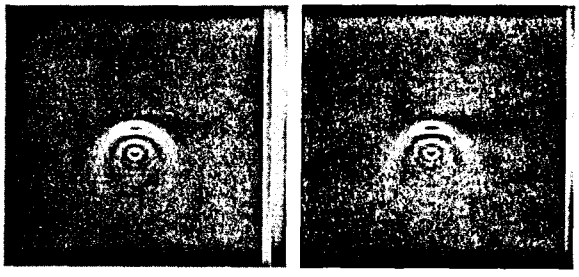


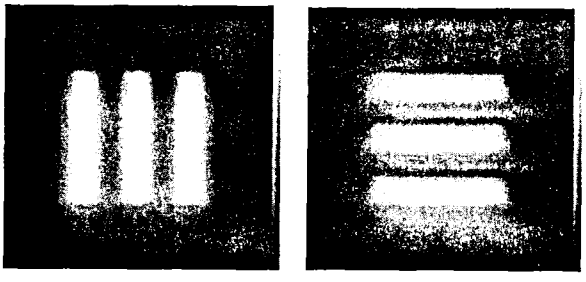
Fig. 1. Optical layout of projection lens.

Fig. 2. Spot diagram of the full field.



(a) Code V (b) OsdA

Fig. 3. PSF of the full field.



(a) radial pattern (b)tangentialm pattern

Fig. 4. Diffraction image of 3-bar pattern.