

## 입력 광파면 왜곡에 따른 광학계 성능

### Optical system performace depending on the input wavefront distortion

김연수, 김현숙, 김병윤\*, 이윤우\*\*, 송재봉\*\*

국방과학연구소, \*한국과학기술원 물리학과, \*\*한국표준과학연구원

ykim@sunam.kreonet.re.kr

#### 1. 서론

광학장비의 결상성능은 회절변조전달 성능(diffraction MTF) 이나 Strehl ratio 로 표시할 수 있다.<sup>[1]</sup> 광학 렌즈 또는 거울의 표면 형상오차등에 기인한 광학성능 저하는 이론적으로 잘 알려져 있으며<sup>[2, 3]</sup>, 입사동에서의 위상변조를 통하여 초분해능 광학계를 개발하려는 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>[4]</sup>

헬기에 장착되어 야간 표적 획득 시스템으로 사용되고 있는 전방관측 적외선 열상장치는 볼 내부에 장착되며, 적외선 통과창으로서 이용되는 Ge 윈도우를 통하여 외부 영상을 획득한다. 따라서 획득된 영상의 질은 윈도우에 의해서도 영향을 받게 된다.

윈도우의 형상 오차가 미세할 경우, 윈도우를 통과한 광선은 파면만이 왜곡된 평행 광선으로 근사할 수 있다. 광학계가 회절한계 성능을 갖도록 설계되었다면, 윈도우를 포함한 광학계의 최종 성능은 윈도우의 표면형상 오차에 의하여 왜곡된 광파면에 기인한 회절효과의 영향을 받게 된다.

#### 2. 윈도우 왜곡에 따른 광로차

그림 1 과 같이 평면 파면을 갖는 평행광선이 왜곡된 윈도우에 입사할 경우, 출력 광파면은 윈도우의 왜곡 주파수의 2 배 주파수를 갖는 광파면 왜곡을 나타내며, 평행광선으로 진행하게 된다. 따라서 광선 추적에 의해 설계된 열상센서 광학계의 설계성능은 변함이 없고, 광학성능의 저하는 광파면의 왜곡으로 인한 회절효과에 의해 야기된다. 회절효과에 의해 나타나는 결상면상의 점 Q 에서의 광 강도분포는 다음 식과 같이 표현된다.<sup>[5]</sup>

$$U(Q) = C \int_0^{2\pi} \int_0^a e^{iOPD} e^{-ik\rho\xi\cos(\theta-\phi)} \rho d\rho d\theta \quad (2)$$

여기서 OPD 는 광파면의 왜곡으로 인한 광로차이다.  $\rho$  와  $\theta$  는 각각 윈도우 좌표에서의 반경 및 방위각 변수이며,  $\xi$  와  $\phi$  는 결상면 좌표에서의 반경 및 방위각 변수를 나타낸다. a 는 윈도우 구경,  $k = 2\pi/\lambda$  이며  $\lambda$  는 사용 파장인  $4.2\mu\text{m}$  이다.

윈도우의 형상 왜곡이 미세하여 윈도우를 통과한 출력광선을 광파면만이 왜곡된 평행광선으로 근사할 수 있을 경우, 광 강도분포에 대한 식 (2) 는 OPD 함수를 알면 계산할 수 있다.

#### 3. 광파면 오차에 따른 광학성능

저주파 왜곡을 갖는 광파면일 경우, 광로차는 Zernike 함수로 나타낼 수 있다. defocus, 3차 구면수차 및 3차 astigmatism 오차를 갖는 광파면일 경우, 회절에 의한 Strehl ratio 는 그림 2 와 같다. Strehl ratio가 0.8 이상이기 위하여 광파면 왜곡의 진폭은 defocus 일 때  $0.13\lambda$ , 3차 구면수차일 때  $0.17\lambda$ , 3차 astigmatism 일 때  $0.18\lambda$  이어야 한다. 고주파 왜곡을 갖는 광파면의 경우, 왜곡을 반경 r 에만 의존하는 공간주파수의 함수나 직교 좌표계의 공간주파수 함수로 나타내어 근사적으로 계산할 수 있다. 반

경 r 에만 의존하는 경우, Strehl ratio 는

$$SR(\sigma, n) = \frac{[\int_0^1 J_0(0) e^{i2\pi\sigma\cos(n\pi\rho/2)} \rho d\rho]^2}{[\int_0^1 J_0(0) \rho d\rho]^2} \quad (3)$$

로 구해진다. 여기서  $\sigma$  는 파장단위로 표시한 광파면 왜곡의 진폭이고,  $\cos(n\pi\rho/2)$  는  $\cos$  함수형태의 광파면 왜곡을 나타낸다. 그림 3 은  $n=20$  일 때 광파면 왜곡의 진폭에 따른 Strehl ratio를 보여준다. Strehl ratio 0.8 이상일려면 광파면 진폭은  $0.11\lambda$  이하이어야 한다.

직교 좌표계의 공간주파수 함수로 나타낼 수 경우, Strehl ratio 는

$$SR = \{ J_0(2\pi\sigma) \}^2 \quad (4)$$

로 구해진다. 여기서  $\sigma$  는 파장단위로 표시한 광파면 왜곡의 진폭이다. 그림 4 는 광파면 왜곡의 진폭에 따른 Strehl ratio를 보여준다. 마찬가지로 Strehl ratio 0.8 이상일려면 광파면 진폭은  $0.11\lambda$  이하이어야 한다.

### 5. 결 론

입력 광파면 왜곡에 따른 광학계의 성능을 Strehl ratio를 통하여 알아보았다. 저주파 왜곡일 경우, Zernike 함수를 사용하였으며, 고주파 왜곡일 경우는 반경 r 의 함수로 표시할 수 있는 경우와 직교 좌표계의 함수로 나타낼 수 있는 경우로 나누어 계산하였다. 계산결과 회절한계 성능을 갖는 광학계의 경우 입력 광파면 왜곡의 peak-to valley 는  $0.22\lambda$  ( $\lambda=4.2\mu\text{m}$ ) 이하이어야 함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] M.Born, E.Wolf, Principles of optics, Pergamon press, 1975
- [2] R.Bhatia, A. Ciani, "Defining mirror quality: a global approach", SPIE 2199, 1994
- [3] J.W.Figoski, "Design and tolerance specification of a wide field, three mirror, unobscured, high resolution sensor", SPIE 1049, 1989
- [4] 이영철,정창섭,박성종,이윤우, "광학계의 위상변조 조건에 따른 중심강도 변화", 한국광학회지 11(2), 2000

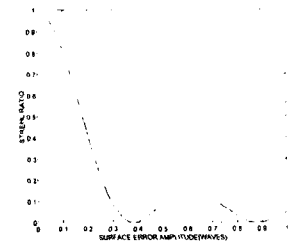
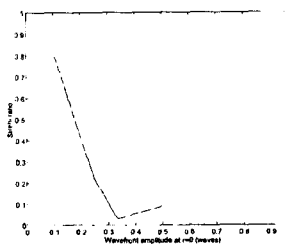
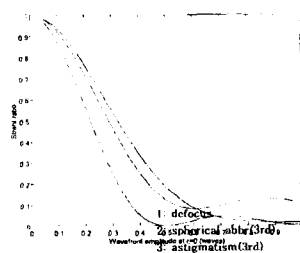


그림 1. 광파면 왜곡

그림 2. Strehl ratio(I)

그림 3. Strehl ratio(II)

그림 4. Strehl ratio(III)