

공간주파수려파방법으로 얻은 6각살창형미세구조물 표본영상에서의 세기분포특성

조천규, 최철규

광학적공간주파수려파방법으로 2차원적미세구조물의 결함을 식별하는 문제는 여러가지 대상물에 대하여 연구되었다.[1, 2] 그러나 6각살창형미세구조물에 대하여 그것의 정규적표본영상에서의 세기분포특성을 밝힌 연구자료는 발표된것이 없다.

우리는 6각살창형미세구조물의 결함을 식별하고 그 정교성을 평가하기 위하여 공간려파기합성의 기본마스크로서 대상물의 표본영상의 세기분포특성을 연구하였다.

6각살창형미세구조물은 직경이 4~6cm, 두께가 0.5~1.0mm인 원판형의 기판에 직경 8~20 μ m인 $10^6 \sim 10^7$ 개의 속이 빈 빛섬유들의 조밀6각배렬구조로 되어있으며 통로중심사이의 간격은 약 12 μ m이고 그 길이와 직경의 비는 40~60이다.[3]

6각살창형미세구조물의 결면에 대한 현미경촬영사진은 그림 1과 같다.

이러한 구조의 대상물에 대한 정규적표본영상을 얻기 위하여 그림 2와 같은 4f체계[4]의 물체면 (x_0, y_0)에 대상물을 설치하고 여기에 He-Ne레이자로부터 나오는 단색평면파를 비쳐주는 경우를 생각한다.

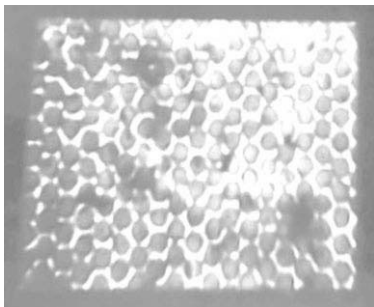


그림 1. 6각살창형미세구조물의 결면에 대한 현미경촬영사진

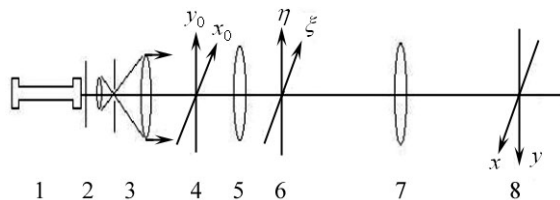


그림 2. 광학적공간려파를 위한 4f체계
1-내부공진기형He-Ne레이자($P=2mW$), 2-빛여닫개,
3-시준광학계, 4-물체면, 5-푸리에변환렌즈($f_1=100mm$),
6-공간주파수스펙트르면, 7-거울푸리에변환렌즈($f_2=400mm$), 8-영상면

그러면 푸리에렌즈의 뒤초점면에는 그림 3과 같은 대상물의 푸리에스펙트르가 나타난다. 여기에 매개 투과요소들사이의 거리가 r 로서 6각형모양으로 배열된 2진공간려파기를 설치하였다.

이때 스펙트르의 매 에돌이반점에 려파기의 투과요소들이 대응되도록 일치시켰다.

이 공간려파기의 진폭투과도함수 $u(\xi, \eta)$ 가 주어져있다고 하면 일반적으로 이러한 4f체계의 영상면에서의 진폭분포 $U(x, y)$ 는 $u(\xi, \eta)$ 의 2차원푸리에변환으로 나타나게 된다.[5]

$$U(x, y) = \frac{A}{i\lambda f_2} \exp\left[-i\frac{k}{2f_2}(x^2 + y^2)\right] \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi, \eta) \cdot \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f_2}(\xi x + \eta y)\right] d\xi d\eta \quad (1)$$

여기서 공간러파기구경밖에서는 $u(\xi, \eta) = 0$ 이므로 적분구간을 $-\infty$ 로부터 $+\infty$ 로 하였다.

이제 공통위상항을 C_0 으로, $v_x = x/(\lambda f_2)$, $v_y = y/(\lambda f_2)$ 로 표시하면 식 (1)은 공간주파수 v_x, v_y 에 대한 2차원푸리에변환으로 된다.

$$U(v_x, v_y) = C_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi, \eta) \exp[-i2\pi(v_x \xi + v_y \eta)] d\xi d\eta \quad (2)$$

주어진 경우에 6각형모양으로 배치된 2진공간러파기의 자리표원점으로부터 매개 투과요소들까지의 거리를 r 라고 하였으므로 러파기의 진폭투과도는 다음과 같다.

$$u_{6/1}(\xi, \eta) = C(\theta) \left[\delta\left(\xi - r, \eta\right) + \delta\left(\xi - \frac{r}{2}, \eta - \frac{\sqrt{3}r}{2}\right) + \delta\left(\xi + \frac{r}{2}, \eta - \frac{\sqrt{3}r}{2}\right) + \delta\left(\xi + r, \eta\right) + \delta\left(\xi + \frac{r}{2}, \eta + \frac{\sqrt{3}r}{2}\right) + \delta\left(\xi - \frac{r}{2}, \eta + \frac{\sqrt{3}r}{2}\right) \right] \quad (3)$$

식 (3)에서 첨수 6/1은 공간러파기에서 1차고리의 6개 투과요소를 표시하며 $C(\theta)$ 는 에돌이각 θ 의 함수로서 에돌이영상이 직경이 d 인 1개 원형구멍에 의한 에돌이무늬에 의하여 진폭변조되게 된다는 사실을 고려한 결수이다.

에돌이각 θ 가 크지 않은 조건에서 $\theta \approx r/f_1$ 이므로 렌즈의 초점거리 f_1 이 주어진 조건에서 결수 $C(\theta)$ 는 r 에 관계되는 결수로 된다.

$$C(\theta) = C(r) = \frac{2J_1(\pi r d / (\lambda f_1))}{\pi r d / (\lambda f_1)} \quad (4)$$

여기서 J_1 은 제1종의 제1차 베셀함수이다.

따라서 식 (3)은 다음과 같이 고쳐쓸수 있다.

$$u_{6/1}(\xi, \eta) = \frac{2J_1(\pi r d / (\lambda f_1))}{\pi r d / (\lambda f_1)} \left[\delta\left(\xi - r, \eta\right) + \delta\left(\xi - \frac{r}{2}, \eta - \frac{\sqrt{3}r}{2}\right) + \delta\left(\xi + \frac{r}{2}, \eta - \frac{\sqrt{3}r}{2}\right) + \delta\left(\xi + r, \eta\right) + \delta\left(\xi + \frac{r}{2}, \eta + \frac{\sqrt{3}r}{2}\right) + \delta\left(\xi - \frac{r}{2}, \eta + \frac{\sqrt{3}r}{2}\right) \right] \quad (5)$$

δ 함수의 푸리에변환성질

$$F\{\delta(\xi, \eta)\} = 1, F\{\delta(\xi - a, \eta - b)\} = \exp[-i2\pi(av_x + bv_y)]$$

를 리용하면 영상에서의 분포는 다음과 같다.

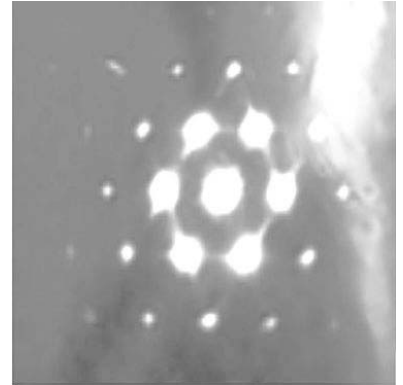


그림 3. 6각살창형미세구조물의 푸리에스펙트럼

$$U(v_x, v_y) = C_0 F\{u_{6/1}(\xi, \eta)\} = 2C_0(r)\{\cos 2\pi v_x + \cos[\pi(v_x + \sqrt{3}v_y)] + \cos[\pi(v_x - \sqrt{3}v_y)]\} \quad (6)$$

$x = rv_x, y = rv_y$ 로 변수변환하면

$$U_{6/1}(x, y) = \frac{4C_0 J_1(\pi r d / (\lambda f_1))}{\pi r d / (\lambda f_1)} \{\cos 2\pi x + \cos[\pi(x + \sqrt{3}y)] + \cos[\pi(x - \sqrt{3}y)]\}. \quad (7)$$

식 (7)은 투과요소들이 r 를 단위로 하여 배치된 공간러파기의 1차 6개 정점투과요소에 의하여 러파된 진폭이며 일반적으로 k 차 6각고리의 정점들에 놓인 6개의 투과요소에 의하여 얻어지게 되는 진폭분포는 다음과 같다.

$$U_{6/k}(x, y) = \frac{1}{3k} \frac{J_1(k\pi r d / (\lambda f_1))}{J_1(\pi r d / (\lambda f_1))} \{\cos 2k\pi x + \cos[k\pi(x + \sqrt{3}y)] + \cos[k\pi(x - \sqrt{3}y)]\} \quad (8)$$

여기서 결수는 제1차 6개 정점투과요소들에 의한 러파영상에서의 세기분포가 $I_{6/1}(0, 0) = 1$ 이 되도록 규격화하여 결정하였다.

여기로부터 러파영상에서의 세기분포는

$$I_{6/k}(x, y) = |U_{6/k}(x, y)|^2 = \frac{1}{9k^2} \frac{J_1^2(k\pi r d / (\lambda f_1))}{J_1^2(\pi r d / (\lambda f_1))} \cdot \{\cos 2k\pi x + \cos[k\pi(x + \sqrt{3}y)] + \cos[k\pi(x - \sqrt{3}y)]\}^2 \quad (9)$$

식 (9)에서 주어진 실험조건 $d=10\mu\text{m}$, $\lambda=632.8\text{nm}$, $f_1=100\text{mm}$, $r=5\text{mm}$ 임을 고려하여 투과 결수를 결정하고 제1차의 6개 정점투과요소에 의하여 얻어지는 러파영상을 규격화된 상대 세기로 그래프화하면 그림 4와 같다.

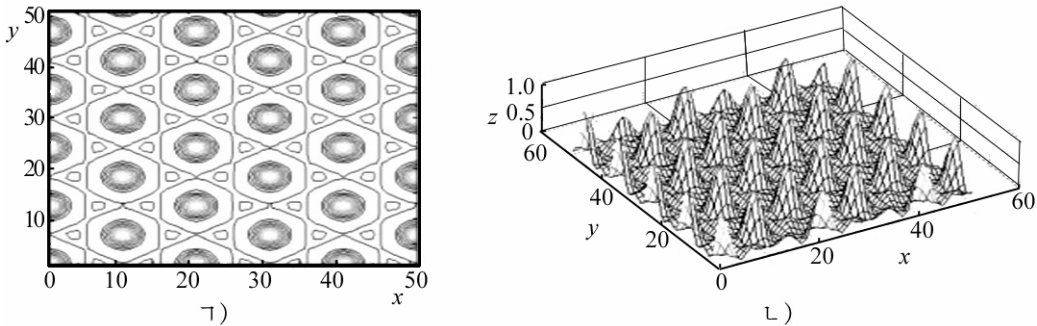


그림 4. 제1차의 6개 정점투과요소에 의한 러파영상
ㄱ) 2차원영상, ㄴ) 3차원영상

1차의 6개 정점투과요소에 의한 러파영상에서 기본공간주기와 보조공간주기는 각각 $\Lambda=1$, $\Lambda'=\sqrt{3}/3$ 이고 1차부극대의 높이는 $I=0.25$ 이다. 일반적으로 모의결과에 의하면 k 차의 6개 정점투과요소에 의하여 얻어지는 러파영상의 기본공간주기와 보조공간주기는 1차의 경우에 비하여 $1/k$ 로 작아지고 극대수밀도는 k^2 배로 증가한다.

러파차수 및 그 조합에 따르는 SN비의 변화특성은 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 조합된 투과요소의 수 n 이 일정한 조건에서는 러파차수 k 에 관계없이 SN비가 같다. 한편 SN비의 값은 일정한 러파차수에 대하여 러파요소의 수 n 이 커질수록 증가하였다. 즉 $k=3$ 차에서 $n=6$ 의 경우보다 $n=18$ 의 경우에 1.5배로 커졌다.

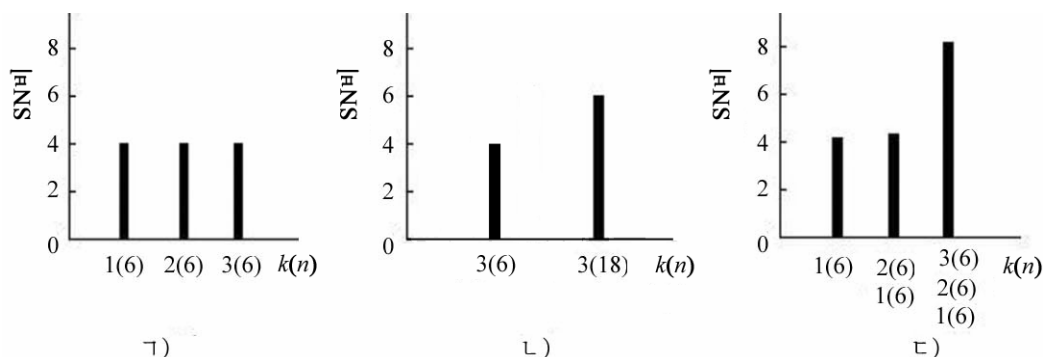


그림 5. 러파차수 및 그 조합에 따르는 SN비의 변화
 ㄱ) $n=6$ 인 경우, ㄴ) n 이 커지는 경우, ㄷ) $n=6$ 의 투과요소들을 조합한 경우

그리고 $k=1, 2, 3$ 차의 6개 투과요소들을 조합하여 리용하는 경우 SN비가 대략 8로서 최대값에 도달하였다.

맺 는 말

- 1) 6각살창형미세구조물의 정규적표본영상을 공간주파수러파방법으로 실현하였다.
- 2) 바늘구멍공간러파기의 $k=1, 2, 3$ 차의 6개 투과요소들을 조합하여 리용하는 경우가 정규적표본합성의 합리적조건으로 된다.

참 고 문 헌

- [1] R. R. Willey; Appl. Opt., 46, 8, 1201, 2007.
- [2] E. Cuhe et al.; Appl. Opt., 42, 11, 1938, 2003.
- [3] C. B. Jonson et al.; Handbook of Optics 1, McGraw Hill, 804, 1995.
- [4] A. Migukin et al.; Appl. Opt., 52, 2, 269, 2013.
- [5] J. W. Goodman; Introduction to Fourier Optics, Stanford University, 98, 2005.

주체104(2015)년 11월 5일 원고접수

Characteristics of the Intensity Distribution in the Model Image of a Hexagonal-Grating-Type Microstructure by Spatial Frequency Filtering

Jo Chon Gyu, Choe Chol Gyu

In order to find defects in an hexagonal-grating-type microstructure by optical spatial filtering, we obtained the intensity distribution of the model image of the structure, which will be used as the mask for spatial filtering, and ascertained its characteristics through computer simulation.

We obtained a normal sample of a hexagonal-grating-type microstructure by spatial frequency filtering. The selection of the 6 vertex points of the pinhole spatial filter at $k=1, 2, 3$ as transmittance units becomes the best condition for composition.

Key words: spatial frequency filtering, grating