

## 스펙클이 없는 회절 이미지 성형을 위한 개구 apodization을 갖는 회절광학소자

### Diffraction optical element with aperture apodization for shaping speckle-free diffraction image

김 휘, 임용준, 최경식, 이병호\*  
서울대학교 공과대학 전기공학부  
e-mail byoungcho@snu.ac.kr

회절광학소자(diffraction optical element)는 입사빔의 공간 위상을 변조하여 임의의 회절 이미지를 관측면에 형성하는 소자이다. 회절광학소자는 초박형의 표면 격자 구조로 되어 있어 반도체 공정을 통해 제작할 수 있으며 높은 회절 효율을 갖기 때문에 광 집적회로에서의 광 결합 및 광 연결, 레이저 빔 성형, 광 정보 처리 등의 다양한 응용 분야에 이용되고 있다. 회절광학소자의 설계에 널리 사용되는 알고리즘은 고속 푸리에 변환(FFT)을 기반으로 한 반복 푸리에 변환 알고리즘(iterative Fourier transform algorithm: IFTA)이다.<sup>(1)</sup> IFTA는 회절광학소자의 설계에서 오랫동안 널리 사용되어 왔고 경험적으로는 신뢰성이 확인되었지만 최적화 과정에서 알고리즘 자체의 구조적 비선형성이 유발하는 수학적 성질들은 비선형성 해석의 어려움으로 인해 현재까지도 완전하게 이해되지 못하고 있다. 최근 IFTA의 비선형적 성질 중 하나인 회절 효율과 균일도 사이의 trade-off에 대한 해석이 시도된 바 있다.<sup>(2)</sup> IFTA의 구조적 비선형성으로 인하여 발생하는 또 다른 성질로는 IFTA의 hard clip operation에 의한 hard clip effect가 있다. 설계 과정에서 hard clip operation은 회절 이미지에 스펙클 패턴을 유발하게 되는데 저자들은 회절 이미지의 스펙클 패턴을 제거하기 위한 방법으로 회절광학소자의 개구(aperture) apodization을 제안한 바 있다.<sup>(3)</sup> 본 논문에서는 회절광학소자 개구 apodization의 최적화에 대하여 증점적으로 논하기로 한다.

IFTA를 통한 회절광학소자의 설계에서 hard clip operation은 회절광학소자가 놓인 입사면 계산 격자(computation grid)에서 반복과정동안 입사빔의 진폭 경계 조건을 만족하기 위하여 급격하게 광파의 진폭을 바꾸는 작용으로서 IFTA가 비선형 알고리즘이 되는 가장 주요한 구조적 특성이다. 이러한 동작에 의해 유발되는 효과가 hard clip effect로 결과적으로 회절광학소자에 의해 생성되는 회절이미지에 복잡한 스펙클 패턴을 유발하게 된다. 이에 대한 몇몇 연구들에서는 입사면 계산 격자에서의 hard clip operation에 의한 진폭의 변화를 단계적으로 완화하는 방식인 soft coding과 초기 이미지 위상 분포를 포물 곡면으로 설정하는 방식을 제안하였다.<sup>(4, 5)</sup> 실제의 시뮬레이션을 통해 보면 포물 곡면을 초기 이미지 위상 분포로 사용하는 방법이 스펙클 제거에 효과적인데 반해 soft coding 방법은 hard clip effect를 완전히 해소하지 못하여 스펙클 제거에 있어 그 효과가 미미함을 알 수 있다.

본 논문에서는 hard clip effect를 최소화하기 위하여 회절광학소자의 개구 영역을 apodization하는 방식을 사용하였다. 최적의 개구 apodization을 결정하는 알고리즘은 그림 1(a)에 나타내었다. 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 2차원 고차 다항식으로 모델링된  $\Omega$ 를 이미지 위상으로 목적 이미지 패턴  $\sqrt{I}$ 를 진폭으로 갖는 복소 광파의 역 Fresnel 변환  $A$ 를 threshold값에 의해 이진화하여 개구 apodization을 구한다. 유전 알고리즘을 사용하여 그림 1(a)에서 정의된 목적 함수  $J$ 를 최소화하는 방식으로 이미지 위상 분포와 apodization 패턴을 최적화하게 된다. 최적화의 목적은 입사빔 투과율의 최대화이다. 그림 1(b)는 최적화된 이미지 위상 분포를 보여준다. 그림 2(a)는 일반적인 회절광학소자의 설계에서 나타나는 회절 이미지와 회절광학소자의 위상 구조를 보여주는데 회절 이미지 내부에 복잡한 스펙클 패턴이 존재함을 알 수 있다. 그림 2(b)는 개구 apodization 최적화를 통해 얻은 회절광학소자의 위상 구조와 회절 이미지를 보여주는데 회절 이미지 내부에 불균일한 에너지 분포가 보일 뿐 스펙클 패턴은 나타나지 않음을 알 수 있다.

본 논문에서는 개구 apodization 최적화 알고리즘을 사용하여 스페클이 없는 회절 이미지를 생성할 수 있고 높은 회절 효율을 갖는 회절광학소자를 설계할 수 있음을 보였다.

Optimization of aperture apodization

$$\text{Minimize } \sum_{x_1, y_1} p(x_1, y_1)$$

$$p(x_1, y_1) = \begin{cases} 0, & A(x_1, y_1) \geq \text{threshold}, (x_1, y_1) \in M \\ 1, & A(x_1, y_1) < \text{threshold}, (x_1, y_1) \in M \\ 1, & A(x_1, y_1) \geq \text{threshold}, (x_1, y_1) \notin M \\ 0, & A(x_1, y_1) < \text{threshold}, (x_1, y_1) \notin M \end{cases}$$

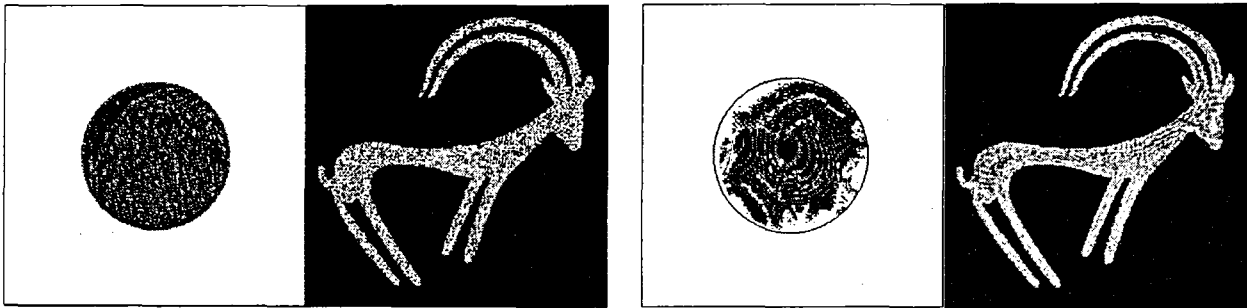
$$A(x_1, y_1) = IFR \left[ \sqrt{I(x_2, y_2)} \exp(j\Omega(x_2, y_2)) \right]$$

(a)



(b)

그림 1. (a) 개구 apodization의 최적화 알고리즘 (b) 최적화된 이미지 위상 분포



(a)

(b)

그림 2. (a) 랜덤 위상 초기치로 설계된 회절광학소자의 위상 분포와 회절 이미지, (b) 최적화된 개구 apodization을 갖는 회절광학소자의 위상 분포와 회절 이미지

\* 본 연구는 과학기술부를 통한 국가지정연구실 사업의 지원에 의해 이루어졌습니다.

1. V. V. Kotlyar, P. G. Seraphimovich, and V. A. Soifer, "An iterative algorithm for designing diffractive optical elements with regularization," *Optics and Lasers in Engineering* vol. 29, pp. 261-268, 1998.
2. H. Kim and B. Lee, "Iterative Fourier transform algorithm with adaptive regularization parameter distribution for the optimal design of diffractive optical elements," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 43, no. 6A, pp. L702-L705, (2004).
3. 김 휘, 박진홍, 양병춘, 이병호, "임의의 빔 형성을 위한 경계변조 회절광학소자의 설계," 한국광학회 2001년도 하계학술발표회 논문집, pp. 84-85, (2001).
4. H. Aagedal, F. Wyrowski, and M. Schmid, *Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications*, edited by J. Turunen and F. Wyrowski, pp. 165-188, (Akademie Verlag GmbH, Berlin, 1997).
5. H. Aagedal, M. Schmid, T. Beth, S. Teiwes, and F. Wyrowski, "Theory of speckles in diffractive optics and its application to beam shaping," *Journal of Modern Optics*, vol. 43, pp. 1409-1421, 1996.

T  
D