

# 임의의 빔 성형을 위한 경계변조 회절 광학 소자(DOE)의 설계

## Design of boundary-modulated diffractive optical element for general beam shaping

김휘, 박진홍, 양병춘, 이병호  
 국가지정 홀로그래피 기술 연구실  
 서울대학교 전기공학부  
 byoungcho@plaza.snu.ac.kr

### 1. 서론

본 논문에서는 빔 성형 문제에 일반적으로 적용될 수 있는 새로운 반복 푸리에 알고리즘 형식을 제안하였다. 빔 성형은 결맞는 레이저 빔을 회절 광학 소자를 이용해 원하는 빔 세기 분포를 갖도록 하는 것을 말한다. 수학적으로는 회절 광학 소자(DOE)의 위상 함수를 회절 적분 방정식의 수치적 근사해로 구하는 것이다. 이를 위해 일반적으로 사용되는 방법이 반복 푸리에 알고리즘이다<sup>[1]</sup>. 빔 분할 문제에 사용되는 경우 높은 회절 효율과 신호 대 잡음비를 얻을 수 있다. 그러나 빔 성형에서는 반복 푸리에 알고리즘에서 사용된 샘플링 포인트 사이의 빔의 세기도 제어할 수 있어야 하기 때문에 일반적으로 빔 분할 문제보다는 어렵다<sup>[2]</sup>. 빔 성형문제에서 중요한 것은 신호 영역에서 발생할 수 있는 나선 스펙클의 최소화이다. 반복 푸리에 알고리즘을 사용하면서도 나선 스펙클을 줄일 수 있는 일반적인 반복 푸리에 알고리즘 형식은 이미 제안된 바 있다<sup>[3,4]</sup>.

그러나 반복 푸리에 알고리즘에 의해서는 나선 스펙클을 제거 할 수 없다고 알려져 있다<sup>[2]</sup>. 따라서 이전 논문들에서는 나선 위상 어긋남이 존재하지 않는 신호 영역의 초기 위상 특성을 반복 과정 동안 소프트 코딩 방식을 통해 최대한 보존하는 방식의 알고리즘들이 제안되었다. 하지만 소프트 코딩 방식을 사용하더라도 마지막 반복 단계에서는 보통의 사각형 또는 원형의 DOE 모양이 강한 제한 조건으로 작용하여 나선 스펙클 쌍들을 만들어 내게 된다. DOE는 입력빔의 단면 모양을 반영하도록 설계되므로 원형이나 사각형의 모양을 갖게 되는데 이러한 조건은 DOE 설계에 있어서 자유도를 제약하는 요소가 된다. 이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 역 프레넬 변환을 사용하여 DOE 영역을 성형하고자 하는 빔 패턴에 따라 적응적으로 변화시켜 회절 빔의 세기 패턴에서 나선 스펙클의 제거와 빠른 수렴속도를 가능하게 하는 반복 푸리에 알고리즘 형식을 논하였다.

### 2. 본론

DOE 영역을 정하기 위하여 성형하고자 하는 회절 패턴에 초기 위상으로 구형 위상을 취하고 이를 역 프레넬 변환한다. DOE 영역에서 얻어진 빔 패턴에서 문턱값 이하의 세기는 모두 0으로 하고, 그 이상의 값은 실제 입사빔의 세기로 치환하는데 문턱값은 치환된 빔을 프레넬 적분하여 얻어진 회절 패턴과 성형하고자하는 빔 패턴의 오차가 가장 작도록 선택한다. 이렇게 얻어진 DOE 영역의 형태를 보존하고 반복 푸리에 알고리즘을 적용하여 DOE를 최적화 한다. 그림 1과 2에서는 이 방법으로 얻어진 DOE와 hard coding 방식의 원형 DOE의 시뮬레이션 예를 보였다.

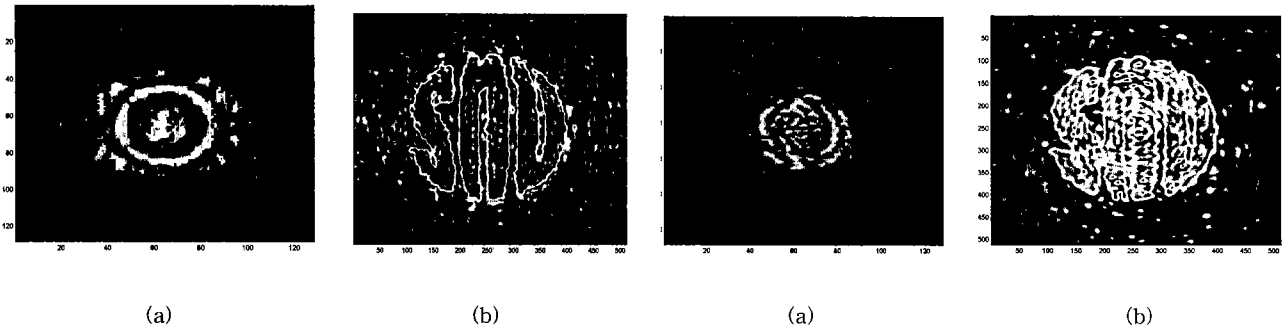


그림 1. 적응형 DOE의 위상 패턴(a)과 회절 빔 패턴(b)

그림 2. Hard coding 원형 DOE의 위상 패턴(a), 회절 빔 패턴(b)

그림 1은 본 논문에서 제안한 방법을 통해 계산한 결과로서, 경계변조 DOE에 의한 회절 패턴(그림 1-(b))에서는 원형 DOE의 회절 패턴(그림 2-(b))에서 볼 수 있는 소용돌이 스펙클이 제거되었음을 알 수 있다. 이는 신호영역의 위상에 반복 계산 과정 동안 위상 어긋남이 생겨나지 않았기 때문이다. 그림 1-(a)에서 보듯 경계변조 DOE의 불규칙한 모양은 빔 성형에 유효한 빔 성분과 스펙클을 만들어내는 불필요한 빔 성분을 공간적으로 필터링 하도록 되어 있다. 경계변조 DOE의 경우 알고리즘의 수렴 속도 또한 현저하게 빨라지게 된다. 따라서 경계변조 DOE는 빔 성형 특성 향상에 있어서는 우수한 특성을 보인다.

이러한 설계 방식은 근소한 입력 에너지의 손실을 수반하지만 신호 영역에서의 최적 초기 위상의 결정을 통해 에너지의 손실을 개선 할 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 기존의 DOE 영역의 모양을 변조하는 방식으로 기존의 반복 푸리에 알고리즘에서 해결하기 어려웠던 나선 스펙클 문제를 극복하는 방법을 제안하였다.

원하는 회절 패턴으로부터 역 프레넬 변환을 통해 얻어진 DOE 영역의 모양을 통해 일차적으로 공간 필터링을 하고 이를 반복 푸리에 알고리즘의 초기값으로 놓고 소프트 코딩을 적용하여 반복 푸리에 알고리즘으로 경계변조 DOE의 위상 패턴을 구할 수 있었다. 시뮬레이션을 통하여 이와 같은 방법이 스펙클 현상의 극복과 수렴 속도의 증가에 좋은 특성을 보임을 보였다. 한편 신호 영역의 최적 초기 위상 결정을 통해 입력빔의 손실을 최소화할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

[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. Aagedal, F. Wyrowski, and M. Schmid, *Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications*, edited by J. Turunen and F. Wyrowski (Akademie Verlag GmbH, Berlin, 1997) pp. 165-188.

[3] 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.

[4] M. Johansson and J. Bengtsson, "Robust design method for highly efficient beam-shaping diffractive optical elements using an iterative-Fourier-transform algorithm with soft operations," *Journal of Modern Optics*, vol. 47, pp. 1385-1398, 2000.