

論文 2001-38SD-5-6

## 컴퓨터 생성 홀로그래픽 디퓨저의 설계

(Design of the Computer Generated Holographic Diffuser)

崔京植\*, 尹鎮善\*, 金 男\*

(Kyong-Sik Choi, Jin-Seon Yoon, and Nam Kim)

## 요 약

본 논문에서는 높은 회절 효율과 균일도를 갖는 컴퓨터 생성 홀로그래픽 디퓨저를 수정된 반복 푸리에 변환 알고리즘으로 설계하였다. 컴퓨터 생성 홀로그래픽 디퓨저를 설계하기 위한 새로운 방법으로 위상형 홀로그램들을 대칭, 결합시킴으로서 계산시간을 감소시켰고 재생되는 신호 영역을 확장하였다. 설계한 16 위상형 홀로그래픽 디퓨저는 85.20%의 높은 회절 효율과 2.43%의 균일도, 18.97[dB]의 평균 신호대 잡음비를 나타내었다. 또한, 컴퓨터 생성 홀로그래픽 디퓨저와 128 단계를 갖는 유사 랜덤 위상 디퓨저를 회절 효율과 균일도 측면에서 비교하였고, 홀로그래픽 디퓨저와 차세대 디스플레이용 소자로서 유용하게 이용될 수 있음을 제시하였다.

## Abstract

In this paper, computer generated holographic diffuser with high diffraction efficiency and uniformity was designed by the modified iterative Fourier transform algorithm. Newly proposed method to design a CGHD is to flip and to combine BPHs or MPHs, so it makes the computation time decreased and it makes the reconstructed signal area enlarged. The designed sixteen phase holographic diffuser had the high diffraction efficiency of 85.20%, the uniformity of 2.43%, and the average signal to noise ratio of 18.97[dB]. Also, we compared the CGHD with a 128 level pseudo random phase diffuser about the diffraction efficiency and the uniformity. The proposed diffuser can be provided good performance for a holographic diffuser and a next-generation display device.

## 1. 서 론

페이지 지향 데이터의 고밀도 홀로그래픽 데이터 저장 시스템이나 홀로그래픽 현상에서 필름에 기록되는 스펙트럼을 평탄화하기 위해 확산 광원의 사용은 필수적이다. 또한, 출력 평면에서 균일한 분포를 갖는 회절 빔의 세기 분포와 회절 격자로서의 높은 회절 효율, 홀로그램 손상 시 재생 가능한 용장성(redundancy)의 증가를 위해 간유리나 특정 패턴들로 인코딩된 유사 랜

덤 디퓨저가 이용되고 있으나, 이들은 무한한 공간 대역폭을 갖기 때문에 공간적으로 유한한 데이터 마스크만이 이용되거나 기록 매질이 입자의 크기로 제한된다면, 입사 광원의 전력 낭비와 균일도 측면에서 비효율적이고, 여러 단계의 제작과정이 필요한 단점을 가지고 있다.<sup>[1~3]</sup> 디지털 홀로그래피에서 스페클의 발생을 감소시키기 위해 결정적인 디퓨저<sup>[4]</sup>, 다만형 디퓨저<sup>[5]</sup>, IFTA(iterative Fourier transform algorithm)를 이용한 물체 의존적인 디퓨저<sup>[6]</sup>들이 제안되었으나, 다만형 디퓨저의 경우는 다 위상형으로 확장할 수 없는 단점이 있고, 결정적인 디퓨저와 물체 의존적인 디퓨저의 경우는 물체의 형태에 따라 계속 변화되어야 하는 단점이 있다.

\* 正會員, 忠北大學校 電氣電子 工學部  
(School of Electrical & Electronics Eng., Chungbuk Nat'l Univ.)

接受日字:2000年6月5日, 수정완료일:2001年4月23日

1960년대 중반 A. W. Lohmann<sup>[7]</sup>이 CGH를 창안한

이래 지속적인 발전을 거듭하여, 회절 효율과 균일도 측면에서 우수한 성능을 보이는 위상형 홀로그래프의 이용이 보편화되어 있다. 특히 전자 빔 리소그래피와 레이저 기록 장치와 같은 미세 제작 공정의 발달로 홀로그래프의 복제 및 대량생산이 가능해졌고, 소형, 경량화됨에 따라 광 교환 소자나, 팬 아웃(fan-out) 소자, 회절 광학 소자, 3차원 디스플레이 소자로서 광 정보처리나 광 메모리, 광 컴퓨팅, 광통신 분야에서 널리 이용되고 있다.<sup>[8~10]</sup>

이차원 위상 홀로그래프의 설계는 조합적인 최적화 문제를 나타낸다. 원하는 영상과 홀로그래프 영역에서 재구성된 영상 사이의 에러 계산과 일치하는 비용 함수를 구하기 위해 최적화 함수를 이용하며, 최적화 과정은 비용 함수를 최소화시키는 것으로서, 간단한 반복 알고리즘은 지역 최소치로 빠질 위험이 있다<sup>[11]</sup>. 지역 최소치에 빠지게 되면 전역 최소치로 수렴할 수 없게 되는데 비하여 본 논문에서 적용한 수정된 IFTA는 이러한 문제를 완화하고 수렴속도를 빠르게 하는 장점이 있다.

2장에서는 CGH를 설계하기 위한 기본 이론을 제시하였고, 3장에서는 CGHD(computer generated holographic diffuser)의 설계 기법과 새로운 제작 방법을 논하였다. 4장에서는 최적화 기법으로서 수정된 IFTA를 이차원 위상 홀로그래프의 설계에 적용하기 위한 알고리즘과 각각의 파라미터들에 대해서 설명하였고, 5장에서는 홀로그래프의 크기를 32×32, 64×64, 128×128로 증가시킴에 따라, BPH(binary phase hologram)와 MPH(multi phase hologram) 각각의 경우에 대해서 회절효율과 균일도, 평균 신호 대 잡음비, 출력 세기 빔들의 표준편차, 계산 시간을 비교한 결과를 제시하였다. 또한, 제안한 CGHD의 우수성을 입증하기 위해 기존의 128 단계를 갖는 유사 랜덤 위상 디퓨저와 다만형 디퓨저를 설계한 CGHD와 회절 효율과 균일도 측면에서 비교 분석하였다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺고 향후 과제를 제시하였다.

## II. CGH

Fourier 홀로그래프의 경우 물체와 홀로그래프 필드 사이에 무한한 크기와 초점거리  $f$ 를 갖는 가상 렌즈가 존재한다. 즉, 그림 1과 같이 두 필드가 이 렌즈의 초점 평면 앞과 뒤에서 존재하기 때문에, 홀로그래프 필드  $U_k(x, y)$ 와 물체 필드  $U_o(\xi, \eta)$ 는 Fourier 변환 관계가

있다.

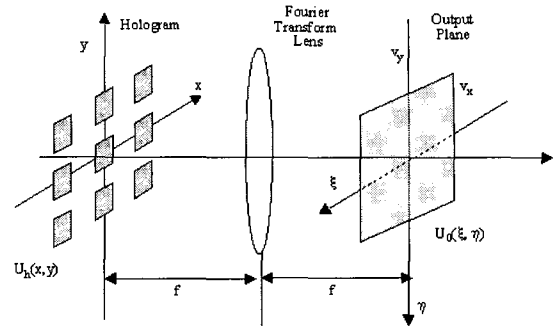


그림 1. Fourier 변환 홀로그래프

Fig. 1. Fourier transform hologram.

수식적으로 표현하면, 다음과 같다.

$$U_k(x, y) = \frac{1}{\lambda f} \int \int_{-\infty}^{\infty} U_o(\xi, \eta) \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda f} (\xi x + \eta y)] d\xi d\eta \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 사용 광원의 파장이다. 만일 물체의 크기가  $N_x \times N_y$ 이라면, 홀로그래프 평면의 스펙트럼은 Whittaker-Shannon의 샘플링 이론에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$2B_x = \frac{N_x}{\lambda f}, \quad 2B_y = \frac{N_y}{\lambda f} \quad (2)$$

홀로그래프 평면에서 샘플링된 격자 간격은 다음과 같다.

$$\Delta x = \frac{1}{2B_x} = \frac{\lambda f}{N_x}, \quad \Delta y = \frac{1}{2B_y} = \frac{\lambda f}{N_y} \quad (3)$$

여기서, 샘플링된 격자 간격은 홀로그래프 재생 시, 출력 평면에서 영상을 구성하는 인접 광들 사이의 간격과 같게 된다. 샘플링된 홀로그래프는 1965년 Cooley와 Tuckey가 제안한 고속 Fourier 변환 기법을 이용하여 빠르게 계산할 수 있다.

홀로그래프 평면에서 복소 필드를 얻은 후, 홀로그래프에서 부호화될 수 있는 그 필드의 표현식을 결정해야 한다. 복소 진폭을 진폭이나 위상으로 부호화하기 위한 방법으로는 잘 알려진 로만(Lohmann)형, 키노폼(kinofom)형<sup>[12,13]</sup>, Lee형<sup>[14]</sup> 등이 있다.

본 논문에서는 높은 회절 효율과 균일도를 갖는 위상형 홀로그래프를 설계하기 위해, 홀로그래프를 여러 개의

직사각형 모양의 셀로 나누어, 각각의 셀에 위상 단계를 2, 4, 8, 16으로 부여할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

### III. CGHD 설계 및 새로운 제작방법

Fourier 평면에서 원하는 위상 성분  $\exp[i\phi(x)]$ 의 중첩을 얻기 위한 방법으로는 위상 마스크로서  $\exp[i\phi(x)]$ 를 생성하는 것과 물체 가까이 그것을 놓는 방법이 있다. 전자를 물체 독립적 디퓨저라 하며, 후자를 물체 의존적인 디퓨저라 한다.<sup>[15]</sup>

#### 1. 디퓨저 설계

물체 독립적인 디퓨저는 랜덤, 유사 랜덤, 결정적 디퓨저와 같이 명시된 영상에 독립적으로 위상 값이 결정된다. 디퓨저로 이용하기 위한 홀로그램을 위상형으로 설계할 때, 각각의 화소에 대한 위상함수는 다음과 같이 주어진다.

$$h(x, y) = \exp[j\phi(x, y)] \quad (4)$$

여기서,  $\phi(x, y)$ 는 위상 값을 나타낸다. 위 식을 Fourier 변환하면 다음과 같다.

$$H(u, v) = \frac{1}{KL} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L h(x, y) \times \exp[-2\pi j(\frac{kx}{K} + \frac{ly}{L})] \quad (5)$$

여기서,  $K$ 와  $L$ 은 출력 평면의 전체 행과 열의 화소 수이며, 출력 평면에서 원하는 패턴의 세기  $I(u, v)$ 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$I(u, v) = |H(u, v)|^2 \quad (6)$$

홀로그램 설계 시 원하는 출력이 나오도록 각 셀들의 위상 값을 결정해 주기 위해서는 반복적이고 많은 시간이 소요되는 최적화 과정을 필요로 한다. 최적화 시킬 비용함수로는 디퓨저의 회절 효율과 균일도 모두를 고려하기 위해서 다음과 같이 정의하였다.

$$E = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L [I(k, l) - T(k, l)]^2 + W \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L [I(k, l) - I_{avg}]^2 \quad (7)$$

여기서,  $I(k, l)$ 은 각각의 화소에 대한 출력 세기 값을 말하고,  $W$ 는 가중 인자(weighting factor),  $T(k, l)$ 은

목표값,  $I_{avg}$ 은 발생시키고자 하는 패턴들에 대한 출력 세기를 평균한 값이다. 식 (8)에서 정성적인 해석을 할 경우, 첫 번째 항이 효율성을 나타내고, 두 번째 항은 균일도를 나타내게 된다. 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 파라미터로는 회절 효율과 균일도, 평균 신호 대 잡음비, 표준편차, 계산시간, 반복횟수를 각각 정의하였다.

회절 효율은 원하는 패턴의 세기 값들의 합으로 다음과 같이 정의하였고,

$$Eff = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L I(k, l) \quad (8)$$

균일도는 원하는 패턴의 세기들 사이의 편차를 말하며, 다음과 같이 정의하였다.

$$U = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{avg}} \quad (9)$$

Fourier 변환 시 출력평면에서는 원하는 영역 이외의 영역에서 잡음 성분이 나타나게 되는데, 이를 평가하기 위한 변수로서 평균 신호 대 잡음비를 이용하였고, 다음과 같이 정의하였다.

$$SNR_{avg} = 10 \log_{10} \left( \frac{I_{avg}}{N_{avg}} \right) \quad (10)$$

여기서,  $I_{avg}$ 은 원하는 출력 세기 분포의 평균값이며,  $N_{avg}$ 은 잡음영역에서의 평균 세기 값을 나타낸다.

계산시간은 Ultra SPARC III 333MHz의 유닉스 시스템에서 프로그램의 시작부터 종료 시까지의 계산시간을 초로 나타내었으며, 반복횟수는 각각의 알고리즘의 비용함수가 더 이상 감소하지 않을 때의 반복 횟수로 나타내었다.

#### 2. 새로운 제작 방법

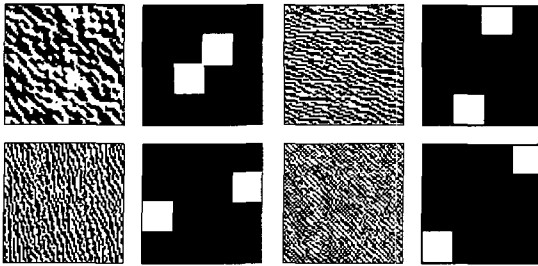
일반적으로, 홀로그래픽 디퓨저로 적용하기 위한 홀로그램의 크기는  $128 \times 128$ 보다 커야 한다.<sup>[18]</sup> 반면에 설계할 홀로그램의 크기가 커질수록 최적화를 위한 계산량과 계산시간은 지수적으로 증가하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 Fourier 변환 홀로그램의 공간 불변성과 공액 대칭성을 이용하여 설계한 홀로그램을 결합 및 대칭시킴으로써 신호영역을 확장하였고, 계산시간을 단축하였다.

Fourier 변환 홀로그램인 경우에는 아래와 같이 공간

불변성(또는 주기성)을 갖는다.

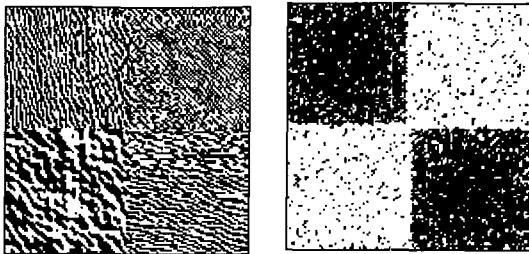
$$F(u+N, v) = F(u, v+N) = F(u+N, v+N) \quad (11)$$

여기서,  $N$ 은 홀로그램의 한 주기를 나타낸다.



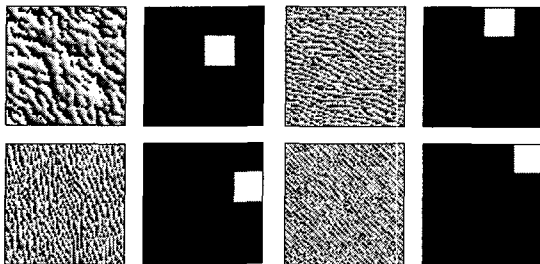
(a) BPH와 재생 영상

(a) BPH and its reconstructed image



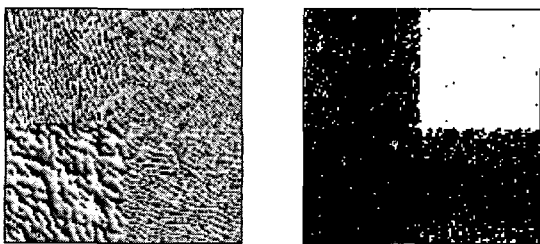
(b) 결합된 BPH와 재생 영상

(b) Combined BPH and its reconstructed image



(c) EPH와 재생 영상

(c) EPH and its reconstructed image



(d) 결합된 EPH와 재생 영상

(d) Combined EPH and its reconstructed image

그림 2. 홀로그램의 결합과 재생 영상

Fig. 2. Combined hologram and its output pattern.

본 논문에서는 이러한 Fourier 변환 특성을 이용하여, 우선 출력 평면을 4개로 나누어 각각의 홀로그램을 최적적으로 설계하였고, Fourier 변환의 공간 불변특성을 이용해 최적화된 홀로그램 4개를 결합시켰다. 그림 2(a)는 이진 위상형인 경우, 설계한 4개의 홀로그램과 출력 패턴을 나타내었고, 그림 2(b)는 그림 2(a)의 4개 홀로그램을 제안된 방식에 의해 결합시키고 그에 따른 출력 패턴을 나타내었다. 그림 2(c)와 그림 2(d)에는 8 위상형(EPH)인 경우에 대해서 각각 나타내었다. 여기서, 홀로그램 크기는  $64 \times 64$ 이며, 이진 위상형인 경우 회절 효율은 72.06%, 균일도는 21.20%를 얻을 수 있었고, EPH인 경우 회절 효율은 78.04%, 균일도는 4.10%를 얻을 수 있었다.

그림 2(a)에서 알 수 있듯이, 이진 위상형으로 설계한 홀로그램의 경우에는 역상이 발생한다. 이러한 역상을 제거하기 위해, 다 위상형으로 설계한 홀로그램은 역상이 제거되어 출력 평면에 나타남을 볼 수 있고, 위상 레벨이 증가함에 따라 재구성 잡음 에러가 감소됨을 알 수 있었다.

위상형 홀로그램의 경우에는 함수  $f(x, y)$ 가 실수일 때, 다음 식과 같이 공액 대칭성을 갖게 되며, 원점 대칭된 홀로그램은 출력 평면에서 공액 쌍으로 나타난다.

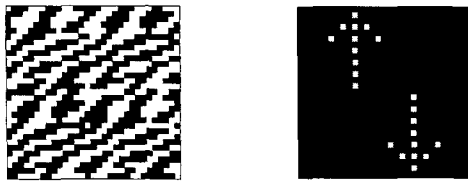
$$F(u, v) = F^*(-u, -v) \text{ or } |F(u, v)| = |F(-u, -v)| \quad (12)$$

이진 위상형인 경우, 출력 평면에서의 출력 영상은 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이, 1사분면에 출력 목표로 설계한 경우, 1사분면과 그것의 역상이 3사분면에 출력된다. 그림 3(a)의 홀로그램을 원점 대칭시킴으로서 2사분면과 4사분면에 공액 대칭되어 출력된 영상을 그림 3(b)에 나타내었다. 이 두 홀로그램을 주기적으로 배치하게 되면, 출력 평면에서 서로 중첩된 영상이 얻어진다. 즉, 홀로그래픽 디퓨저로 이용했을 때, 기존 출력 영역을 확대할 수 있고, 계산시간을 단축시킬 수 있다. 그림 3(c)와 3(d)에는 다 위상형 홀로그램을 대칭시킨 경우와 그의 출력 패턴을 나타내었다.

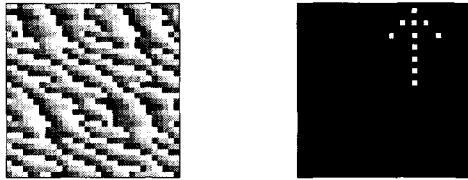


(a) BPH와 재생된 영상

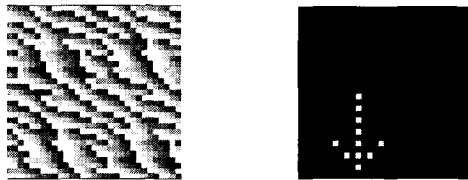
(a) BPH and its reconstructed image



(b) 대칭된 BPH와 재생된 영상  
(b) Fliped BPH and its reconstructed image



(c) MPH와 재생된 영상  
(c) MPH and its reconstructed image



(d) 대칭된 MPH와 재생된 영상  
(d) Fliped MPH and its reconstructed image  
그림 3. 홀로그래ムの 대칭과 출력 영상  
Fig. 3. Fliped hologram and its output image.

IV. 최적화 기법

1972년 Gerchberg와 Saxton에 의하여 제안된 기존의 IFTA는 FFT를 활용하므로 계산시간이 걸림되지만, 국소 최소점에 고착하는 문제가 있어 이를 개선하기 위한 알고리즘들로 SA(simulated annealing), GA(genetic algorithm), ED(error diffusion) 등이 이용되고 있다<sup>[16,17]</sup>. 본 논문에서는 기존의 IFTA의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 위상 복원 방법을 이용하였고, 보다 빠른 수렴을 위하여 프로그램의 시작과 끝 부분에서 FFT를 취하였다. 또한, 프로그램의 내부에서도 IFFT(inverse fast Fourier transform)를 취하지 않고, 홀로그래ムの 진폭과 위상 정보를 실수부와 허수부로 나누어, 원하는 패턴에 대해서 새로운 위상 값을 받아들이는 경우에만 cosine변환과 sine변환을 취함으로써 계산시간을 단축시켰다.

최적화된 홀로그래ム을 생성하기 위해 적용한 수정된 IFTA의 순서도를 그림 4에 나타내었다.

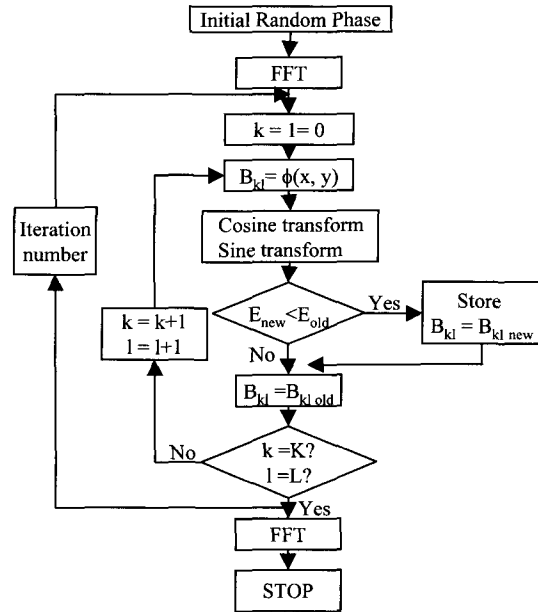


그림 4. 수정된 IFTA의 순서도  
Fig. 4. Flowchart of the modified IFTA.

우선, 임의의 위상 값으로 홀로그래ム을 초기화하고 FFT를 취하여, 출력 평면에서 우리가 원하는 목표 값의 회절 효율과 균일도 값을 갖도록 설정한 비용함수 값( $E_{old}$ )을 구한다. 다음으로 홀로그래ム을 구성하는 한 픽셀의 위상 값을 변환하고 새로운 비용 함수 값( $E_{new}$ )을 구하여, 이전에 구한 비용 함수 값( $E_{old}$ )보다 더 작으면 새로운 위상 값을 받아들이고, 그렇지 않은 경우에는 이전의 위상 값을 그대로 취한다. 이러한 과정을 홀로그래ムの 전체 크기에 대해서 각 화소의 위상 함수  $\phi(x, y)$  값을 최적화하고, 비용함수가 더 이상 감소하지 않거나 주어진 반복횟수만큼 수행되었을 때 프로그램을 종료한다. 기존의 IFTA는 격자의 크기와 출력 패턴의 크기가 클 경우 상대적으로 긴 계산 시간을 필요로 한다. 특히, 홀로그래默 디퓨저로 이용하기 위한 홀로그래默을 설계하기 위해서는 격자의 크기가 커야하고, 출력 평면 전체를 계산하여야 하기 때문에 상당한 계산시간을 요구한다. 하지만, 본 논문에서는 수정된 IFTA와 새롭게 제안한 결합 및 대칭 기법을 적용함으로써 보다 빠른 계산시간을 보장하였다. 이진 위상형의 경우에는 위상 값을 0와  $\pi$  값으로 하였고, 4위상형 홀로그래默(four level phase hologram : FPH)인 경우는 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$  값으로, 8위상형 홀로그래默(eight level

phase hologram : EPH)인 경우는  $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$ 의 값으로, 16 위상형 홀로그램 (sixteen level phase hologram, SPH)의 경우는  $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, \pi/2, 5\pi/8, 3\pi/4, 7\pi/8, \pi, 9\pi/8, 5\pi/4, 11\pi/8, 3\pi/4, 13\pi/8, 7\pi/4, 15\pi/8$ 값으로 각각 할당하였다. 최적화된 위상 값을 구하기 위해 앞의 식 (8)에서 정의한 비용 함수가 이용되는데, 본 논문에서는 회절효율과 균일도 모두를 고려하였기 때문에 가중 인자의 값에 따라 효율과 균일도가 큰 차이를 보였다. 따라서, 적절한 가중 인자를 구하기 위해 0.01부터 100 까지 반복적인 시뮬레이션을 해본 결과, 홀로그래픽 디퓨저로 이용하기에 적절한 12의 값을 취하였다. 그림 5는  $32 \times 32$  크기를 갖도록 설계한 위상형 홀로그램의 회절효율과 균일도 측면에서 비용 함수가 수렴해 가는 과정을 2위상(BPH)인 경우와 4위상(FPH), 8위상(EPH), 16위상(SPH)에 대해서 각각 시뮬레이션한 그래프를 나타낸다.

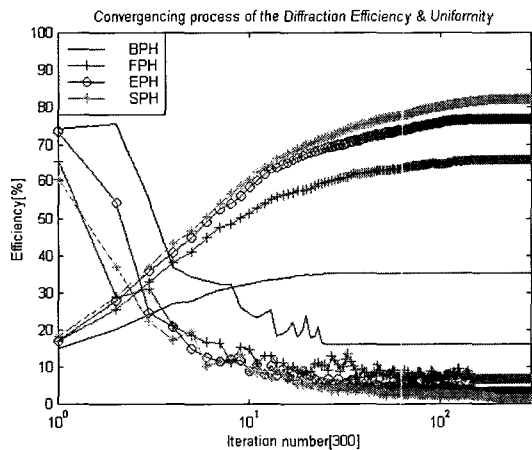


그림 5. 회절 효율과 균일도의 수렴과정  
Fig. 5. Converging process of the diffraction efficiency and the uniformity.

그림 5에서 각각의 회절 효율과 균일도 값은 표 1, 2, 3, 4에 나타내었다. 그림을 통해 알 수 있듯이 홀로그램의 위상 레벨을 증가시킬수록 회절 효율 값은 증가하고, 균일도는 감소함을 알 수 있었다. 여기서, 이진 위상의 경우 역상으로 출력되는 값은 회절 효율 값에 포함시키지 않았다.

V. 시뮬레이션 결과

위에서 제시한 수정된 IFTA 알고리즘을 이용해 설

계한 홀로그램을 각각의 위상별로 홀로그램의 크기변화에 따른 회절 효율과 균일도, 평균 신호 대 잡음비, 표준편차, 반복횟수, 계산시간을 표 1, 2, 3, 4에 나타내었다.

표 1. 설계된 BPH의 성능 파라미터  
Table 1. Performance parameters of the designed BPH.

위상	이진위상(BPH)		
	홀로그램 크기	32X32	64X64
회절효율[%]	70.28	72.06	72.90
균일도[%]	16.04	21.20	22.54
SNRavg[dB]	11.27	11.49	11.85
표준편차[%]	0.3805	0.0953	0.0231
반복횟수[회]	25	63	207
계산시간[초]	101	14695	245766

표 2. 설계된 FPH의 성능 파라미터  
Table 2. Performance parameters of the designed FPH.

위상	4위상(FPH)		
	홀로그램 크기	32X32	64X64
회절효율[%]	66.08	66.28	67.37
균일도[%]	6.88	8.23	8.78
SNRavg[dB]	15.54	14.96	15.06
표준편차[%]	0.2732	0.0757	0.0180
반복횟수[회]	153	214	411
계산시간[초]	910	21900	365031

표 3. 설계된 EPH들의 성능 파라미터  
Table 3. Performance parameters of the designed EPH.

위상	8위상(EPH)		
	홀로그램 크기	32X32	64X64
회절효율[%]	76.71	78.04	79.14
균일도[%]	3.34	4.10	4.06
SNRavg[dB]	17.34	17.56	17.62
표준편차[%]	0.1758	0.0436	0.0101
반복횟수[회]	148	528	753
계산시간[초]	1463	21655	564462

표 4. 설계된 SPH의 성능 파라미터  
Table 4. Performance parameters of the designed SPH.

위상	16위상(SPH)		
	32X32	64X64	128X128
회절효율[%]	82.14	84.60	85.20
균일도[%]	1.56	1.88	2.43
SNRavg[dB]	18.12	18.02	18.97
표준편차[%]	0.0990	0.0221	0.0062
반복횟수[회]	198	1363	1000
계산시간[초]	2317	27590	563673

위의 표 1, 2, 3, 4에서 볼 수 있듯이 위상 레벨이 증가할수록 회절 효율과 균일도, 평균 신호 대 잡음비, 표준편차가 더욱 좋아짐을 볼 수 있으나, 계산시간이나 반복횟수는 증가됨을 볼 수 있다. 또한, 각각의 위상 값에 대해서 홀로그램의 크기가 증가할수록 회절 효율이 증가하였다. 여기서, 주목할 만한 것은 홀로그램의 크기가 증가할수록 평균 신호 대 잡음비가 개선된다는 것이다. 이는 실제의 광학소자로 이용하기 위해서 반드시 필요한 것이다.

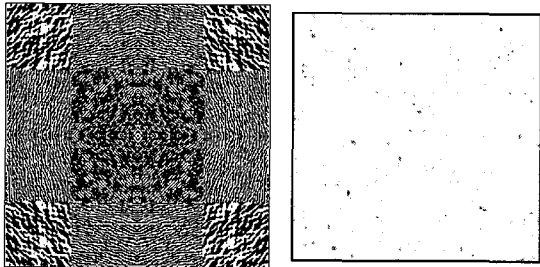


그림 6. BPHD와 출력 패턴  
Fig. 6. BPHD and its output pattern.

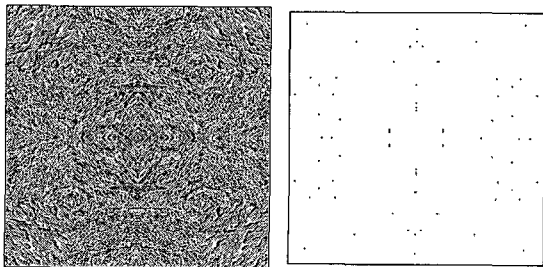
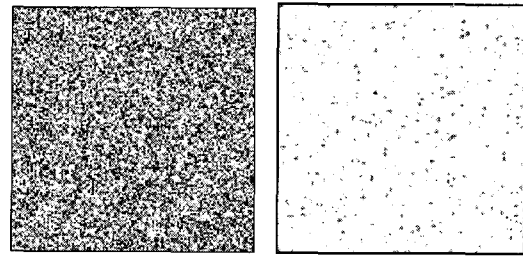


그림 7. SPHD와 출력 패턴  
Fig. 7. SPHD and its output pattern.

그림 6과 그림 7에 Fourier 변환 홀로그램의 대칭성과 공간 불변성을 이용해 새롭게 제안한 방법으로 설계한 CGHD와 출력 평면에서의 출력 패턴을 나타내었으며, 그림 8에서는 128 단계로 설계한 유사 랜덤 위상 디퓨저와 출력 평면에서의 세기 분포를 나타내었다.



(a) 유사 랜덤 위상 디퓨저 (b) 출력 패턴  
(a) Pseudo random phase diffuser (b) Output pattern

그림 8. 128 단계 유사 랜덤 위상 디퓨저의 홀로그램과 출력 패턴

Fig. 8. 128-level pseudo random phase diffuser and its output pattern.

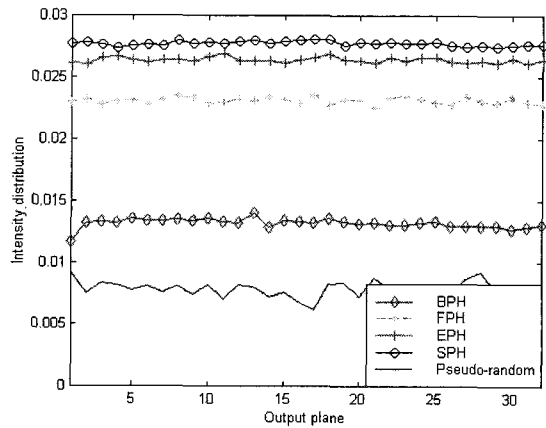


그림 9. 위상형 홀로그램들과 유사 랜덤 위상 홀로그램의 비교

Fig. 9. Comparison of the designed phase holograms and the pseudo random phase hologram.

그림 6과 7에서 볼 수 있듯이, 이진 위상형 홀로그래픽 디퓨저(BPHD)인 경우는 16 위상형 홀로그래픽 디퓨저(SPHD)인 경우보다 출력 평면에서 스펙클 잡음이 많이 발생함을 볼 수 있으나, 그림 8의 128 위상을 이용한 유사 랜덤 디퓨저보다는 잡음이 훨씬 덜 나타남

을 알 수 있었다. 따라서, 제안된 방식에 의해 설계된 디퓨저가 기존의 유사 랜덤 디퓨저에 비해 훨씬 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있었다.

그림 9에서는 수정된 IFTA를 이용하여 설계한 각각의 홀로그램과 유사 랜덤 위상 홀로그램의 세기 분포를 나타내었다. 출력 평면의 크기를  $32 \times 32$ 로 설계하여 최적화시킨 홀로그램의 세기 분포를 각각의 위상별로 나타내었으며, 이진 위상형 홀로그램의 경우는 역상을 포함시키지 않았다.

그림 10에서는 새롭게 제안한 방법으로 설계한 홀로그래픽 디퓨저와 128 단계를 갖는 유사 랜덤 위상 디퓨저의 회절 효율을 비교하였다. 홀로그램의 크기를  $128 \times 128$ 로 하였고, 2차원 세기 분포를 1차원으로 비교하기 위해서 각 행별로 합산하여, 정규화한 그래프이다.

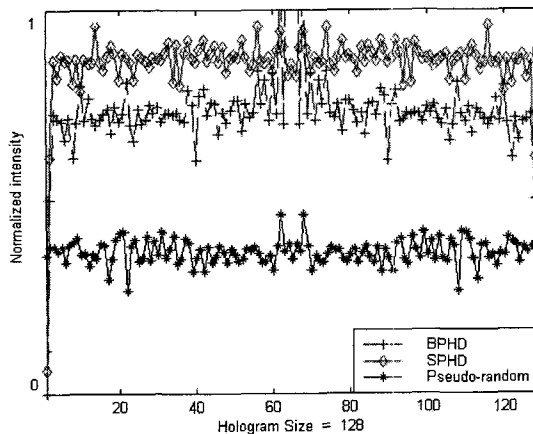


그림 10. 설계한 CGHD와 유사 랜덤 위상 디퓨저의 비교

Fig. 10. Comparison of the designed CGHD and the pseudo random phase diffuser.

일차원으로 설계한 다만형 디퓨저의 경우 70% 정도의 회절효율을 갖고 있으나, 이것을 이차원으로 확장하였을 경우에는 회절효율이 50%에도 미치지 못하고, 다 위상형으로 확장할 수 없는 단점을 가지고 있다.<sup>[19]</sup> 또한, 현재 연구중인 홀로그래픽 반사판의 경우 약 50% 정도의 회절효율 밖에 보장하지 못한다.<sup>[20]</sup> 하지만, 본 논문에서 새롭게 제안한 방법으로 설계한 이진 위상형 홀로그래픽 디퓨저는 이차원인 경우에도 70%이상의 높은 회절 효율을 얻을 수 있었고, 다 위상형으로 확장이 가능하여 16 위상형으로 설계한 경우에는 85.20%의 높은 회절 효율을 얻을 수 있었다. 그러나, 위상 레벨이

많아질수록 제작 공정이 많고 어려운 단점이 있다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 128 단계를 갖는 유사 랜덤 위상 디퓨저보다 설계한 컴퓨터 생성 홀로그래픽 디퓨저가 높은 회절 효율과 균일도를 나타냄을 알 수 있었다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 출력 평면에서 빔의 균일한 세기 분포와 높은 회절 효율을 얻기 위해, 수정된 IFTA를 이용해 컴퓨터 생성 홀로그램을 설계하였다. 홀로그램의 크기가  $32 \times 32$ ,  $64 \times 64$ ,  $128 \times 128$ 인 경우에 이진 위상형으로 설계하였을 때, 회절 효율은 약 70%, 72%, 73%를, 균일도는 16%, 21%, 23%를, 평균 신호 대 잡음비는 11.27[dB], 11.49[dB], 11.85[dB]를 각각 얻었다. 또한 각각의 홀로그램 크기에 대해서 16위상형으로 설계하였을 때, 회절 효율은 약 82.14%, 84.60%, 85.20%를, 균일도는 1.56%, 1.88%, 2.43%를, 평균 신호 대 잡음비는 18.12[dB], 18.02[dB], 18.97[dB]를 각각 얻었다. 또한 Fourier 변환 특성인 대칭성과 공간 불변성을 이용해 대칭 및 결합시키는 새로운 방법을 제안하였다. 이렇게 제안된 CGHD는 축적화를 위한 계산시간을 대폭 감소시키면서 기존의 출력 평면을 보다 확장할 수 있는 장점을 가진다. 설계한 이진 위상형 홀로그래픽 디퓨저와 다 위상형 홀로그래픽 디퓨저는 기존의 128위상을 갖는 유사 랜덤 위상 디퓨저나 다만 디퓨저보다 높은 회절 효율과 균일도를 나타냄을 알 수 있었다.

향후 과제로서 보다 우수한 성능을 갖는 CGHD를 설계하기 위해서는 홀로그램의 크기가 증가할수록, 그리고 홀로그램의 위상 단계가 높을수록 높은 신호 대 잡음비와 회절효율, 출력 평면에서 회절 빔의 균일한 분포를 얻을 수 있었기 때문에 홀로그램의 크기와 위상 단계를 모두 증가시켜야 한다. 또한, 광학적 구현을 위해서는 리소그래피 공정에 의한 제작이 필수적이다. 그러나, 홀로그램의 크기가 커지고 위상 단계가 높아질수록 최적화를 위한 계산시간이 증가하고, 제작이 복잡하다는 단점이 있다. 또한, 최적화된 위상형 홀로그램을 새롭게 제안한 방법으로 설계하였으나, 출력 평면에서 무시할 수 없는 재구성 잡음에러가 발생하였다. 앞으로 이러한 스펙클 잡음을 최소화시키기 위한 많은 연구가 이루어져야 한다.



## 참 고 문 헌

- [1] Y. Takeda, Y. Oshida, and Y. Miyamura, "Random phase shifters for Fourier transformed holography", *Appl. Opt.*, vol. 11, no. 4, pp. 818~822, 1972.
- [2] Y. Nakayama and M. Kato, "Diffuser with pseudorandom phase sequence", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 69, no. 10, pp. 1367~1372, 1979.
- [3] W. Chao, S. Chi, C. Y. Wu, and C. Kuo, "Computer-generated holographic diffuser for colormixing", *Opt. Comm.*, vol. 151, no. 1, pp. 21~24, 1998.
- [4] W. J. Dallas, "Deterministic diffusers for holography", *Appl. Opt.*, vol. 12, no. 6, pp. 1179~1187, 1973.
- [5] M. Poutous, "Damman gratings as phase diffusers in Fourier holography", *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 29, pp. 6827~6832, 1994.
- [6] R. Brauer, U. Wojak, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Digital diffusers for optical holography", *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 18, pp. 1427~1429, 1991.
- [7] A. W. Lohman and D. P. Paris, "Binary Fraunhofer holograms generated by computer", *Appl. Opt.*, vol. 6, no. 6, pp. 1739~1748, 1967.
- [8] F. Wyrowski, "Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 7, no. 6, pp. 961~969, 1990.
- [9] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill Book Co., San Francisco, pp. 351~371, 1968.
- [10] H. H. Suh, C. H. Kwak, and E. H. Lee, "Combined binary-phase holograms for free-space optical interconnection", *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 20, pp. 2131~2133, 1995.
- [11] 최경식, 윤진선, 김남, "빔 패턴 발생에 따른 SA와 GA 기법의 비교 분석", 제 4회 광 정보 처리 학술 발표회 논문집, vol. 5, no. 1, pp. 150~155, 1999
- [12] L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan, "The kinoform: a new wavefront reconstruction device", *IBM J. Res. and Dev.*, vol. 13, no. 1, pp. 150~155, 1969.
- [13] J. Turunen, A. Vasara, and J. Westerholm, "Kinoform phase relief synthesis: a stochastic method", *Opt. Eng.*, vol. 28, no. 11, pp. 1162~1167, 1989.
- [14] W. H. Lee, "Sampled Fourier transform hologram generated by computer", *Appl. Opt.*, vol. 9, no. 3, pp. 639~643, 1970.
- [15] P. S. Hillaire, "Phase profiles for holographic stereograms", *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 83~89, 1995.
- [16] J. R. Fineup, "Iterative method applied to image reconstruction and to computer generated holograms", *Opt. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 297~305, 1980.
- [17] F. Wyrowsiki and O. Bryngdahl, "Iterative Fourier transform algorithm applied to computer holography", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 5, no. 6, pp. 1058~1065, 1988.
- [18] M. R. Feldman and J. R. Rowlette, "Beam homogenizer", U. S. Patent 5610733, 1977.
- [19] 이득주, 위상형 회절격자와 공간 광 변조기를 이용한 능동적인 자유공간 광 연결 장치, 석사학위논문, 충북대학교, 1996
- [20] 우성일, 백흠일, 이기동, 윤태훈, 김재창, 장주석, "반사형 LCD를 위한 홀로그래픽 반사판의 제작", *한국광학회지*, vol. 10, no. 1, pp. 27~31, 1999

## 저 자 소 개



崔京植(正會員)

1973년 10월 23일생. 1999년 2월 충북대학교 전기전자공학부 졸업(공학사). 2001년 2월 충북대학교 일반대학원 정보통신공학과 졸업(공학석사)  
2000년 8월 ~ 현재 : 삼성종합기술

원 위촉연구원. 주관심분야: Optical Information Processing, Computer generation Hologram, 3-D Display, Optical Communication and interconnection, Optical Pattern Recognition, Optical Security



尹 鎭 善(正會員)

第37卷 SD編 第9號 參照



金 男(正會員)

第33卷 A編 第3號 參照