

# 홀로그래픽 정보 저장 장치의 데이터 페이지 주파수 특성 및 광학 시스템 표현

## Frequency characters of Holographic data storage system's data page And Description of optical system

김활\*, 전성빈\*, 김도형\*\*, 박노철<sup>†</sup>, 박영필\*

Hwal Kim, Sungbin Jeon, Do-Hyung Kim, No-Cheol Park and Young-Pil Park

### Abstract

The selective frequency analysis method is suggested in the holographic data storage system with the nyquist aperture to reduce the size of hologram. The image filter was designed with many different methods to improve the bit error rate caused by the nyquist aperture. In previous the methods of image restoration for HDS, an iteration time and a highly precise point spread function were necessary. In this paper, we describe the optical system with analytic method. Thereby, we expect our result help the researchers to design the filter.

**Key Words :** 홀로그래픽 정보 저장(Holographic data storage), 주파수 분석(Frequency analysis), 나이키스트 어퍼처(Nyquist aperture)

### 1. 서 론

기존의 광학 디스크 드라이브(ODD)와 비교하여 홀로그래픽 데이터 저장 장치는 비트 데이터 형식이 아닌 페이지 단위로 정보를 저장한다. [1] 이러한 기록 방식은 기록되는 데이터 크기를 증가시키고 기록 매질의 사용량을 증가시킨다. 미디어의 소모를 감소시키기 위해 홀로그래픽 데이터 저장 장치는 푸리에 렌즈(Fourier Lens)를 사용해서 푸리에 면에 저장하고, 나이키스트 어퍼처를 사용하여 저장 장치의 저장 용량을 증가시킨다. [2] 나이키스트 어퍼처를 사용하면 저장되는 홀로그램 사이즈를 감소시켜 저장 용량을 증가시킬 수 있지만, 동시에 나이키스트 어퍼처에 의한 고주파수 성분의 손실이 발생하여 비트 오차율(Bit Error Rate)을 증가시킨다. [3]

비트 오차율은 비트 단위의 정보의 오차율을 매 개변수화 한 것으로 정보 저장 시스템에서 가장 중요한 수치 중 하나이다. 그러므로 비트 오차율을 감소 시키는 것은 홀로그래픽 데이터 저장 장치에서 중요한 이슈이다. 이는 다른 정보 저장 시스템의 연구의 목표와 같다. 데이터 페이지(data page)를 만드는 다양한 종류의 변조 코드가 제안되었다. [4] 채널 모델링이 연구 되었으며, [5] 2 차원의 오정렬(misalignment)을 보완하기 위한 기계 공학적 문제에 대한 연구도 진행되었다. [6] 이러한 연구는 신호 프로세싱(signal processing) 방법에 기초를 두었다.

전통적인 광학 장치와 달리 홀로그래픽 정보 저장 장치는 데이터 페이지 단위로 정보를 저장하기 때문에 기존의 신호 프로세싱의 접근법 보다는 이미징 프로세싱(imaging processing)의 방법에 기반을 두고 접근할 수 있다. 이러한 이유로 비트 오차율의 성능은 정보 저장 장치의 광학 시스템이 획득한 데이터 페이지의 질과 강한 상관 관계가 있다. 그러므로, 이미징 프로세싱의 방법을 사용하여 비트 오차율을 향상시키는 접근 방법은 HDS 연구에서 상당히 고려해야 할 사항이다.

<sup>†</sup> School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4530

\* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

\*\* Center for Information Storage Device, Yonsei Univ.(CISD)

최근의 연구에선 BER 을 감소시키기 위해 이미지 복원 방법(image restoration method)에 기반을 둔 Deconvolution 방법을 제안되었다. [7] 이미지 복원 방법은 BER 의 향상에 효과적인 방법이지만, 원하는 성능을 얻기 위해서는 점 확산 함수의 정확한 정보가 필요하다. 이러한 정보는 정밀한 광학 시스템의 광학 디자인 프로그램을 통해서 부분적으로 해결이 가능하다. 또 다른 연구에서는 이러한 점 확산 함수의 정보 없이 데이터 페이지의 이미지 질을 향상시키는 필터를 Iteration 방법을 통해 만들었다. [8]

이번 연구에서는 향후 이미지 복원 필터를 제작할 때 필요한 이론적 요구와 데이터 페이지의 주파수 성분을 분석하기 위해 수학적 표현 식을 사용한다. 수식을 기존의 광학 디자인 프로그램의 결과와 비교하여 타당성을 입증하여 앞으로 나이키스트 어퍼처를 사용하는 홀로그래픽 정보 저장 장치의 이미지 복원 필터를 제작하는데 도움을 주고자 한다.

## 2. 연구 배경

### 2.1 HDS 시스템

HDS 시스템은 기존의 광학 저장 장치와 다르게 비트 단위의 정보가 아닌 페이지 단위로 정보를 저장한다. 그러므로 인코딩(Encoding)과 디코딩(Decoding) 과정이 필요하다. 인코딩 과정에서 원본 정보가 패턴 이미지로 변환되고, 이를 데이터 페이지라고 부른다. 이러한 패턴은 검은색과 흰색의 픽셀로 구성되며 각각 0 과 1 을 나타낸다. 데이터 페이지는 공간 광 변조기(Spatial Light Modulation)을 통해서 광학 정보로 변환되고, 간섭 패턴으로 홀로그램 미디어에 저장된다. 저장된 정보는 기준 빔(Reference Beam)을 조사하여 정보를 복원하고, 이를 이미지 센서를 통해서 정보를 획득한다. 복원된 이미지는 디지털화된 이진법의 정보로 변환되고 디코딩 과정을 통해 원본데이터를 얻게 된다.

### 2.2 나이키스트 어퍼처를 사용한 홀로그래픽 정보 저장 장치

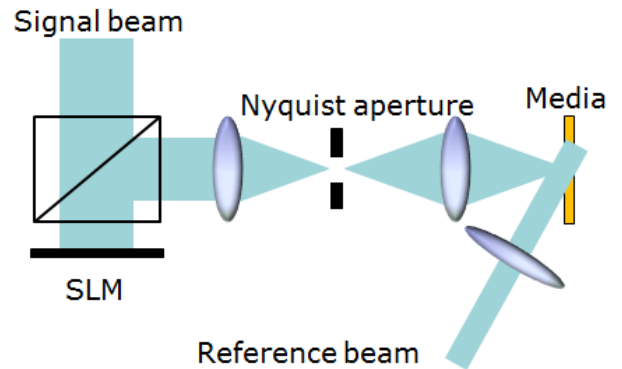


Fig. 1 Optical system configuration with Nyquist aperture

HDS 는 물체 빔(Object Beam)과 기준 빔의 간섭 패턴을 통해 정보를 저장한다. 광학적인 방법을 통해 정보를 저장하기 위해서 데이터 페이지는 SLM 을 통해서 광학적 신호로 변환되어야 하고, 홀로그램 사이즈를 줄이기 위해 푸리에 변환(Fourier Transform)된 정보 형태로 홀로그램 미디어에 저장한다. 이는 Fig.1 을 통해 표현했다. 홀로그램 사이즈를 줄이기 위해 푸리에 면에 정보를 저장하지만 고주파수 성분이 남아있고, 이는 기록 매질의 추가적인 소모를 일으킨다. 이에 대한 해결 방법 중 하나는 나이키스트 어퍼처를 사용해서 홀로그램의 사이즈를 감소시키고, 미디어의 물질 소모를 감소시킨다.

$$D = \Gamma \frac{\lambda f}{\delta} \quad (1)$$

나이키스트 어퍼처 사이즈는 Eq. (1)을 사용하여 계산할 수 있다. D 는 나이키스트 어퍼처의 사이즈이고,  $\Gamma$  는 나이키스트 팩터(nyquist factor)이고,  $\lambda$  는 레이저의 파장이며,  $f$  는 물체 렌즈의 초점 거리(focal length)이고,  $\delta$  는 SLM 의 픽셀 사이의 거리(pixel pitch)이다. Fig. 1 에 나타나 있듯이 나이키스트 어퍼처는 데이터 페이지 이미지의 저주파 통과 필터(low-pass filter)의 역할을 한다. 간략하게 말하면, 나이키스트 어퍼처의 사이즈가 작아질수록 홀로그램 사이즈와 홀로그램간의 간격이 점점 더 줄어들게 된다. 이를 통해 어퍼처 사이즈가 작아지면 홀로그램 정보 저장 장치의 저장 밀도가 증가한다. 하지만 이와 동시에 광학 수차를 발생시켜 이미지의 질을 감소 시킨다. 이는 나이키스트 어퍼처가 푸리에 면에서 홀로그램의 고주파수 성분을 차단시켜 홀로그램 사이즈를 감소 시키기 때문이다.

이러한 현상은 저장 용량을 향상시키는 데 도움을 주지만 동시에 작은 크기의 나이키스트 어퍼처는 광학 시스템의 수차를 더해 HDS의 비트 에러율을 증가시킨다.

### 2.3 데이터 페이지의 주파수 특성

일반적인 이미지와 데이터 페이지 이미지의 주파수 특성을 분석했다. 두 개의 일반적인 이미지의 주파수 특성을 보면, 서로 다른 두 개의 이미지의 주파수 성분이 서로 확연히 차이를 보이고, 전체적으로 중심 성분 값이 크며 중심에서 멀어질수록 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 일반적인 이미지에서는 중요한 특정 주파수 영역이 없기 때문에 이미지에 따라서 필터가 나타내는 성능이 차이를 유추할 수 있다. 그러므로 이미지마다 필터의 특성을 바꿔야 최적의 성능을 얻을 수 있다.

일반적인 이미지가 나타내는 주파수 특성과 HDS의 데이터 페이지의 특성이 차이를 Fig. 2를 통해 볼 수 있다. 원본의 아날로그 데이터가 특정한 변조 코드에 의해서 이진 데이터로 변환된다. 데이터 페이지는 독특한 성질들을 가지고 있다. 일단 각각의 데이터 페이지가 같은 개수의 “on” 픽셀(0)과 “off” 픽셀(1)을 가지고 있고, 기록 과정에서 각각의 데이터 페이지의 강도를 평균화하기 쉽도록 했다. 두 번째, 변조 코드가 HDS 데이터 페이지에서 부가적인 제한 조건으로 작용한다. HDS 시스템에서 다양한 종류의 변조 코드가 사용될 수 있다. 이 논문에서는 6:8 변조 코드를 사용하였다. 6 비트의 데이터를 8 비트의 데이터 세트로 변조시킨다. 8 비트의 데이터 세트에는 각각 4개의 1과 4개의 0으로 구성되어 있다. 총 70개의 경우의 수가 존재한다.

비록 70개의 다양한 패턴이 존재하지만 온 픽셀(on-pixel)의 위치에 초점을 맞춰서 분석할 수 있다. 이 경우 70여개의 데이터 패턴은 5가지의 그룹으로 구분할 수 있다. 하지만 이미지의 공간 주파수 관점으로 볼 때, 각각의 그룹은 그룹 별로 같은 공간 주파수 성분을 가지고 있다고 볼 수 있다. 다시 말해서, 비록 데이터 페이지가 70여개의 데이터 세트의 조합이지만, 결국 5개의 데이터 타입으로 구분할 수 있다. 이런 제한 조건을 통해, 만약에 데이터 페이지가 동일한 변조 코드를 통해서 만들어 졌다면 높은 개연성으로 두 데이터 페이지

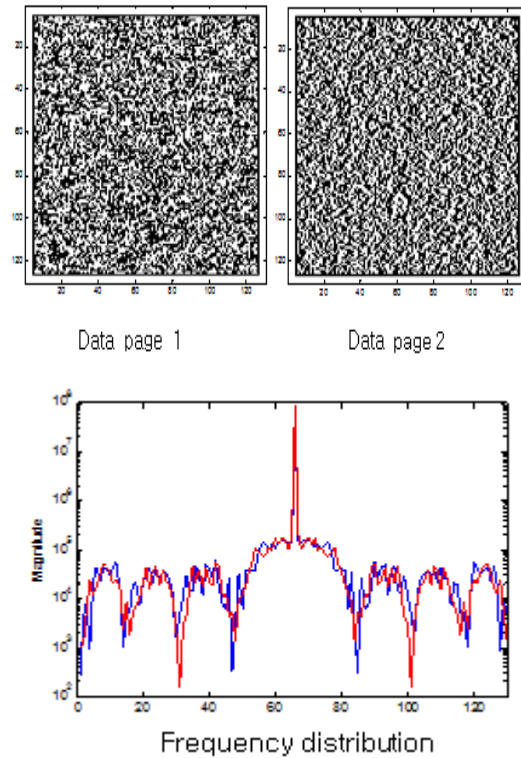


Fig. 2 Spatial Frequency Distributions of the data pages

의 공간 주파수 성분이 비슷한 것을 설명할 수 있다. 이러한 가정을 확인하기 위해 서로 다른 두 개의 데이터 페이지와 각각의 공간 주파수 성분의 분포를 Fig. 2에서 보여준다.

데이터 페이지의 공간 주파수 분포는 일반적인 이미지의 공간 주파수 분포와 상당히 다른 특성을 나타낸다. 일반 이미지는 서로 다른 이미지에 대해서 다른 주파수 특성을 나타내지만 데이터 페이지의 주파수 분포는 서로 다른 데이터 페이지지만 거의 같은 주파수 분포를 나타낸다. 이를 통해 이전의 이미지 프로세싱은 각각 이미지마다 최적화된 필터가 다르다면, 데이터 페이지의 주파수 특성을 기반으로 필터 디자인을 한다면 광범위한 이미지에 사용할 수 있는 최적화된 이미지 필터 제작이 가능할 것이다.

## 3. 광학 시스템의 수식적 표현 및 시뮬레이션

4f 시스템을 기반으로 홀로그래픽 데이터 저장 장치에서 사용되는 광학 시스템을 수학적으로 표현하고자 했다. 본 논문에서 사용한 광학 시스템의 파라미터는 공간 광 변조 장치의 픽셀 피치는

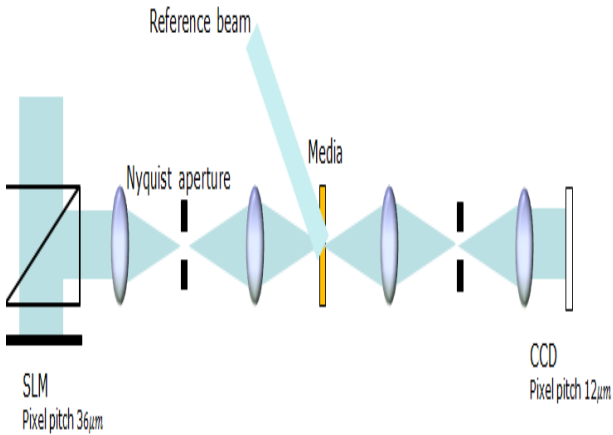


Fig. 3 Configuration of the holographic data storage

36 $\mu\text{m}$ , 레이저의 파장은 532nm, 대물 렌즈의 초점 거리는 125mm를 사용했다. 광학 시스템의 배치는 Fig. 3에 자세하게 나와있다.

광학 시스템을 수학적으로 표현 하는 방법은 크게 2가지가 있다. 광학 시스템의 광원이 인코히어런트(incoherent) 또는 코히어런트(coherent)인지에 따라서 수학적으로 표현하는 방법이 다르다. 홀로그래픽 저장 장치는 일반적으로 물체에서 반사 혹은 회절된 빛과 파면의 정보를 알고 있는 기준 빛의 간섭 무늬를 홀로그램 미디어에 저장하는 방식으로, 이는 두 빛이 코히어런트함을 의미한다.

코히어런트와 인코히어런트의 가장 큰 차이는 전자는 빛의 Amplitude가 linear shift invariant를 만족시키고, 후자는 빛의 intensity가 LSI를 만족시키는 것으로 차이가 있다. 이는 수식으로 표현할 수 있다.

$$g_{out} = g_{in} * h \quad (2)$$

$$g_i^{out} = g_i^{out} * h_i \quad (3)$$

$$g_i^{out} = |g_{in}|^2 \quad (4)$$

(2)식과 (3)식은 각각 코히어런트와 인코히어런트에서 시스템을 통과한 이미지를 나타내는 수식이고, (4)에서 보는 것처럼 각각 amplitude와 intensity 정보가 된다. 이는 시스템의 Transfer Function을 나타낼 때 차이가 더욱 크게 나타난다.

$$\text{Amplitude Transfer Function} = H = \text{Pupil Function} \quad (5)$$

$$\text{Transfer Function} = \mathcal{H} = H \otimes H \quad (6)$$

위의 식에서 보는 것과 같이 두 개의 식은 각각 코히어런트와 인코히어런트의 시스템의 Transfer function을 나타낸다. (5)의 식은 Amplitude Transfer Function으로 pupil function과 같고, (6)은 pupil function의 autocorrelation으로 나타내어진다. 두 식의 가장 큰 차이는 (6)식의 컷-오프 주파수가 (5)식에서 나오는 결과보다 2배 크다는 것이다.

코히어런트 표현식으로 4f 시스템을 표현하면 ATF가 시스템에서 사용하는 나이퀴스트 어퍼처의 직경을 갖는 원형 동공 함수로 표현할 수 있다. 그러므로 데이터 페이지가 광학 시스템을 통과한 후 얻는 이미지는 데이터 페이지의 푸리에 변환과 동공함수의 곱을 한 후 다시 푸리에 변환을 통해서 이미지를 얻을 수 있다.

Fig. 4을 보면 데이터 페이지의 이미지와 동공 함수를 표현하고 있다. 위에서 언급한 것처럼 시스템을 통과하면 Fig. 5에서 보는 것과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이를 이용하여 나이퀴스트 넘버와

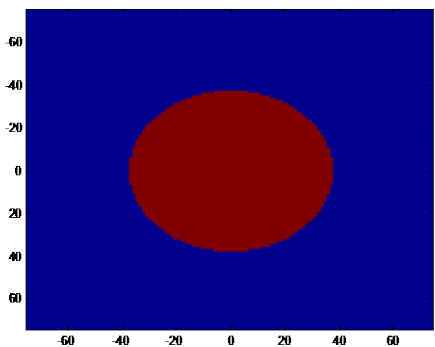
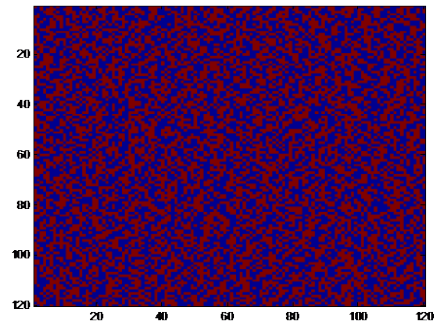


Fig. 4 Data page & Nyquist Aperture function

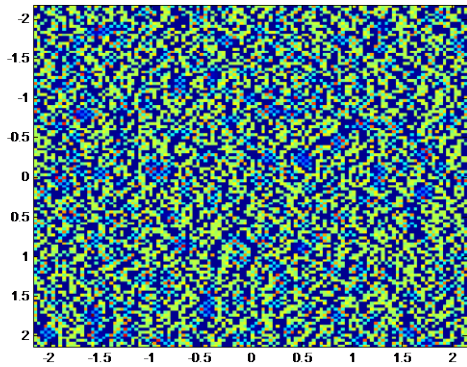


Fig. 5 Output Image

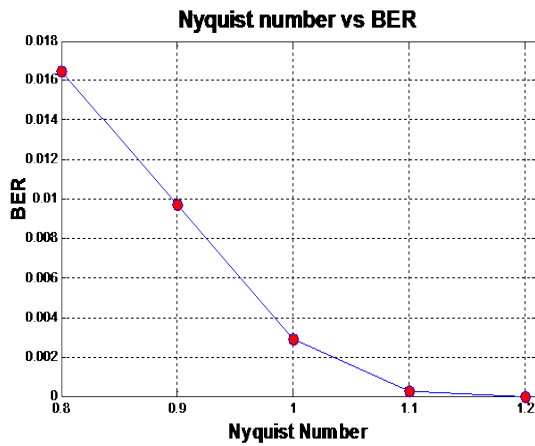


Fig. 6 Nyquist Number vs BER

BER의 상관관계를 그래프를 통해 나타내면 Fig. 6에서 보는 것과 같이 나이키스 어퍼처의 사이즈가 줄어들면 BER이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 기존에 알려진 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다. 이에 대한 이유로는 동공 함수를 통과하는 주파수 성분이 동공 함수의 반지름에 비례하는 컷-오프 공간 주파수 이상의 고주파수 성분이 차단되기 때문에 발생하는 결과로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 이를 통해 홀로그래픽의 특정 주파수 특성을 분석하고 광학 시스템을 표현하는 두 가지 방법에 대하여 고찰한 후 홀로그래픽 데이터 저장 장치의 광학 시스템을 수학적으로 표현했다. 이를 통해 기존에 알려진 나이키스트 어퍼처와 비트 에러율과의 상관관계를 본 연구에서 나타낸 수식으로 같은 경향성을 나타냈다. 이를 통해 데이터 페이지와 광학 시스템의 Transfer function의 성

질을 이용하여 향후 필터 디자인 연구에 기여할 것으로 예상된다.

#### 후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-009378)

#### REFERENCES

- [1] John F. Heanue, Matthew C. Bashaw, Lambertus Hesselink, 1994, "Volume Holographic Storage and Retrieval of Digital Data", Science, Vol. 265, No. 517, pp. 749-752
- [2] Venkatesh Vadde, Bhagavatula Vijaya Kumar, Geoffrey W. Burr, Hans J. Coufal, John A. Hoffnagle, et al, 1998, "Figure of merit for the optical aperture used in digital volume holographic data storage", SPIE Optical data storage, Vol. 3401
- [3] J. T. Gallo, M. L. Jones, and C. M. Verber, 1994, "Computer modeling of the effects of apertures in the Fourier-transform plane of Fourier-transform imaging systems", AppOt, Vol. 33, Issue 14, pp. 2891-2899
- [4] Geoffrey W. Burr, Jonathan Ashley, Hans Coufal, Robert K. Grygier, John A. Hoffnagle, C. Michael Jefferson et al, 1997, "Modulation coding for pixel-matched holographic data storage", Optics Letters, Vol. 22, Issue 9, pp. 639-641
- [5] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, 1995, "Channel codes for digital holographic data storage", JOSA, Vol. 12, Issue 11, pp. 2432-2439
- [6] Geoffrey W. Burr, 2002, "Holographic data storage with arbitrarily misaligned data pages", Optics Letters, Vol. 27, Issue 7, pp. 542- 544
- [7] Sang-Hyuck Lee, Sung-Yong Lim, Nakyeong Kim, No-Cheol Park, Hyunseok Yang et al, 2011, "Increasing the storage density of a page-based holographic data storage system by image upscaling using the PSF of the Nyquist aperture", Optics Express, Vol. 19, Issue 13, pp. 12053-12065
- [8] Do-Hyung Kim · Sungbin Jeon · No-Cheol Park · Kyoung-Su Park, 2014, "Iterative design method for an image filter to improve the bit error rate in holographic data storage systems", MST, Volume 20, Issue 8-9, pp 1661-1669