



# 인코히어런트 홀로그래피의 최근 기술동향

김수길 <호서대학교 공과대학 디지털제어공학과 교수>

## 1 서론

고해상도, 풀 컬러, 넓은 시야각을 가지는 3차원 영상을 구현하기 위해 많은 과학자들이 연구하고 있다. 지금까지 다양한 방법들이 연구되었으며, Gabor가 제안한 홀로그래피는 3차원 영상의 저장 및 재생을 위한 가장 유용한 수단중의 하나이다. 대다수의 홀로그램은 레이저를 이용하여 만들어지는데, 이는 레이저의 높은 결맞음 특성으로 인해 홀로그램을 생성하고 재생하기가 쉽기 때문이다.

그런데, 레이저는 가간섭길이의 한계로 인해 3차원 물체에 대한 홀로그램의 생성 및 재생에 있어서 폭넓은 응용이 제한되고 있는 상태이다. 이에 대한 대안으로 제시된 것이 가간섭길이에 제한을 받지 않는 인코히어런트 홀로그래피이며, 인코히어런트 홀로그래피는 3차원 물체를 구성하는 각 지점의 위치와 빛의 세기를 프레넬 존 패턴(FZP)으로 표현하며, 3차원 물체는 이러한 FZP의 중첩으로 표현된다.

Lohmann과 Cochran이 인코히어런트 홀로그래피를 소개한 이후 많은 관심을 받지 못했다. 그 이유는 물체가 커질수록 홀로그램에서 재생되는 신호대 잡음비가 급격히 높아지며, 동축 홀로그램의 경우에는 실상이 DC항과 공액영상이 동시에 재생되기 때문에 영상의 질을 떨어뜨린다는 것이다.

이러한 문제점은 시간반송자와 공간반송자를 도입하거나 위상천이를 이용하여 원하는 실상만을 구할 수 있는 방법들이 제시됨으로써 거의 해결이 된 상태이다.

본문에서는 현재까지 가장 많은 주목을 받고 있는 인코히어런트 홀로그래피 기술을 위주로 각 기술의 원리 및 동향을 소개하고자 한다.

## 2. 인코히어런트 홀로그래피

### 2.1 삼각간섭계를 이용한 인코히어런트 홀로그래피

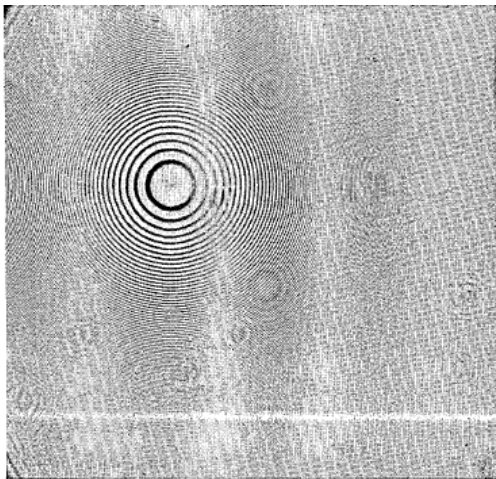
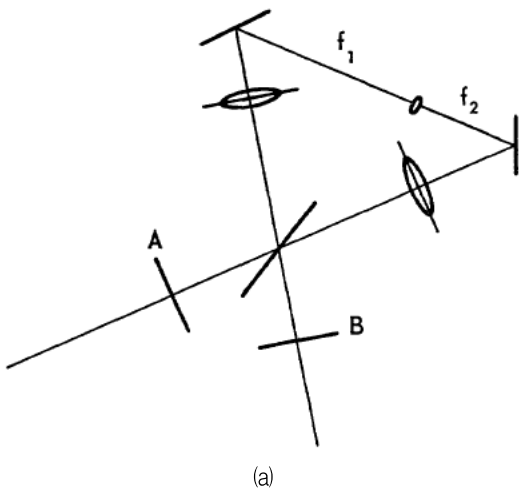
그림 1의 Cochran 삼각 간섭계는 인코히어런트 광원에서 발산되는 빛이 광분할기에서 분할되어 하나는 시계방향으로 다른 하나는 반시계방향으로 진행한다. 시계 방향과 반시계 방향의 렌즈배율이 다르도록 조정함으로써 시계방향과 반시계방향으로 진행한 빛은 출력면에서 위상차가 발생하게 되고, 이 위상차로 인해 관측자나 광검출기로 간섭패턴을 얻을 수 있게 된다.

그림 1 (a)에서 A면은 렌즈 L1과 L2로부터 각각  $f_1$ ,  $f_2$ 만큼 떨어진 평면이며 B면도 마찬가지이다. 미러와 미러 사이에는 밴드패스 필터가 위치해 있으며,

## 기술해설

물체에서 반사된 빛을 좁은 파장대를 가지는 빛으로 만드는 역할을 한다.

백색광원을 사용하면, 점광원에서 나오는 빛에는 파장이 다른 빛들이 혼재되어 있으나 필터에 의해 출력면(B면)에서는 특정한 파장만이 도달하게 되며 다른 점광원간에는 간섭무늬가 만들어지지 않는다. 따라서, 하나의 점광원에서 발산되는 빛은 출력면에서 특정한 파장에 의한 간섭무늬 그림 1 (b)와 같은



(b)

그림 1. Cochran 삼각 간섭계 및 이를 이용한 홀로그램

FZP를 생성한다.

삼각간섭계를 이용하여 만든 홀로그램은 바이어스와 공액영상이 포함되어 있다. 삼각 간섭계를 이용하여 얻은 홀로그램을 재생할 때, 복원된 영상에는 바이어스 및 공액영상이 동시에 존재한다.

변형 삼각 간섭계는 Cochran 삼각간섭계의 단점을 개선하여 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻을 수 있는 시스템이며, 그림 2와 같다. 그림에서 Linear polarizer는 선형편광기를, 그리고 wave plate는 파장판을 나타내며, lens1과 lens2는 초점거리가 각각  $f_1$ ,  $f_2$ 인 렌즈들이다. PBS (Polarizing Beam Splitter)는 편광 광분할기를 나타낸다. 변형 삼각계에서 파장판과 선형편광기를 제거하면 기존의 삼각간섭계와 같다.

변형 삼각간섭계에서 시계방향과 반시계방향으로 진행되는 빛이 출력면에서 더해지게 되는데, 출력면 쪽에 위치한 선형편광기와 파장판을 이용하여 두 빛의 상대적인 위상차를 조절함으로써 출력면에서 4가지의 빛의 세기를 얻을 수 있다.

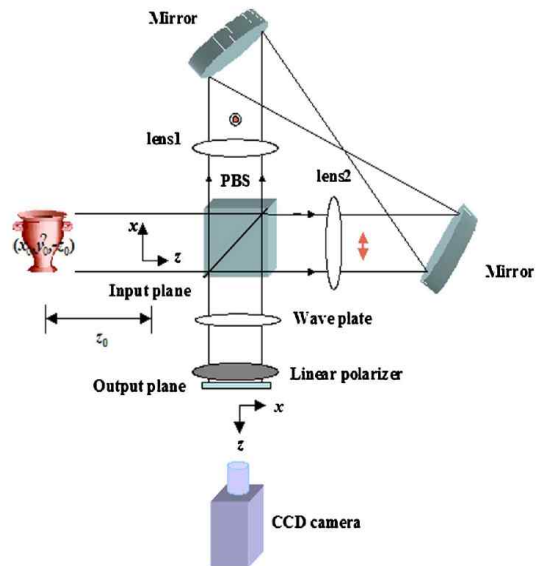


그림 2. 변형 삼각간섭계

4개의 빛의 세기를 전자적으로 조합함으로써 3차원 정보가 포함된 위상을 가진 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 얻을 수 있으며, 이를 결합하여 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻을 수 있다.

최근에는 그림 3과 같이 컬러영상을 기록하고 재생하는 비축형식의 삼각간섭계가 제안되었다. 이 시스템에서는 한 쪽 미러를 기울여 푸리에 변환 홀로그램을 기록하고 이 영상을 재생하여 DC항과 공액영상이 제거된 컬러영상을 구현하였다.

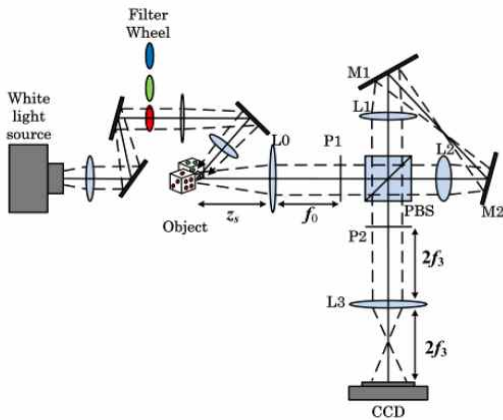


그림 3. 비축(off-axis) 푸리에 삼각간섭계

그림 4는 비축 푸리에 삼각간섭계를 사용하여 주사위를 푸리에 홀로그램으로 기록하고 재생한 결과를 보여준다.

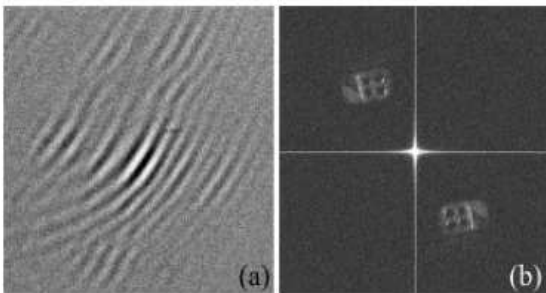


그림 4. 홀로그램 및 복원영상

그림 5는 비축 푸리에 삼각간섭계를 사용하여 주사위를 R, G, B에 대하여 푸리에 홀로그램으로 기록하고 재생한 결과를 보여준다. 그림 5 (d)는 RGB영상을 합성한 컬러영상이다.

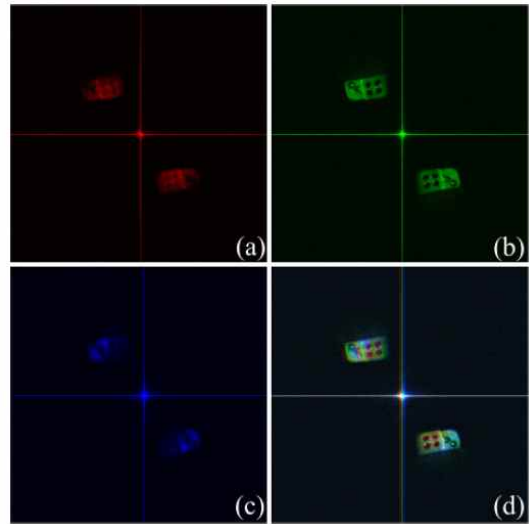


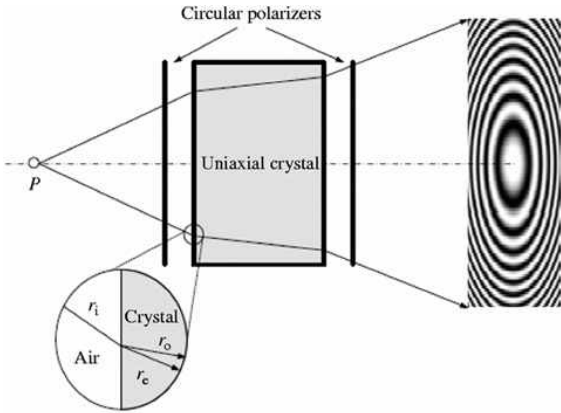
그림 5. 컬러 복원영상

## 2.2 Conoscopic holography

코노스코픽 홀로그래피는 단축결정에서의 빛의 전파를 토대로 한다. 단축결정에서 복굴절은 광경로 상에서 빔의 진입각도에 따라 굴절률이 달라지게 하는 역할을 한다. 빔이 복굴절 결정을 통과하고 한쌍의 편광기를 통해서 보면 기록면에서 간섭무늬가 관측된다.

다른 유사한 홀로그래피와 마찬가지로 각 점광원은 점광원의 횡축과 종축 위치를 암호화하는 FZP를 기록면에서 만들며, 홀로그램은 FZP들의 중첩으로 이루어진다. 코노스코픽 홀로그래피 시스템은 그림 6과 같이 원형편광기 사이에 단축결정이 위치해 있으며, 결정에서 각 점광원에서 나온 단색파는 두 개의 파로 분할되어(ordinary wave와 extraordinary wave) 다른 속도로 진행하게 된다. 두 개의 파는 출력 편광

기에 의해 결합되어 위상차가 진폭변조로 바뀌게 되어 FZP을 생성한다.



Notes: ( $r_i$  = incident ray;  $r_o$  = ordinary ray;  $r_e$  = extraordinary ray)

그림 6. 코노스코픽 홀로그래피 시스템

코노스코픽 홀로그래피와 기존방식 홀로그래피의 기본적인 차이점은 코노스코픽 홀로그래피에서는 신호와 기준빔이 동일한 기하학적인 경로를 거치면서 다른 광로의 길이를 가진다는 사실이다. 그림 7은 2차원 물체에 대한 홀로그램 생성 시스템을 나타내며, 그림 8은 이 시스템을 이용하여 생성한 홀로그램과 복원영상을 보여준다. 그림 8의 왼쪽 열은 resolution target에 대한 홀로그램을 보여주고, 오른쪽 열은 홀로그램을 재생한 영상을 보여준다.

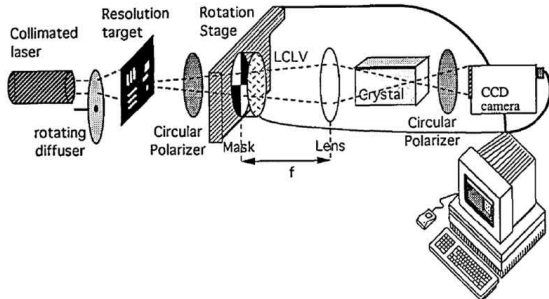


그림 7. 2차원물체 홀로그램 생성 시스템

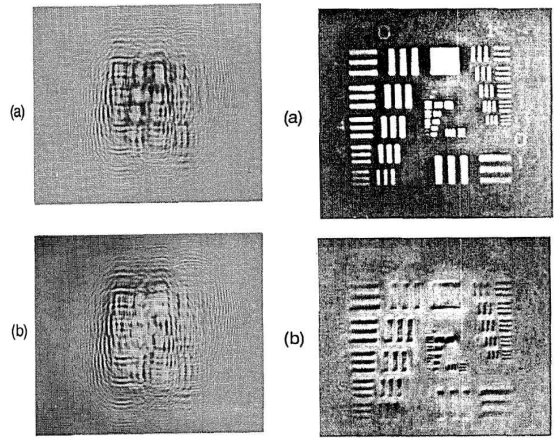


그림 8. 홀로그램 및 복원영상. 왼쪽의 두 그림은 실수부 및 허수부 홀로그램이며, 오른쪽은 각각의 홀로그램을 이용하여 복원한 resolution target 영상

코노스코픽 홀로그래피는 현재 3차원 물체의 홀로그램 생성외에도 여러 분야에 활용되고 있다. 그 중의 하나가 표면의 상태를 마이크로 단위로 계측하여 눈으로 볼 수 없거나 다른 장비로 감지할 수 없는 미세한 부분들을 볼 수 있게 해 주는 장치이며, 그림 9와 같다.

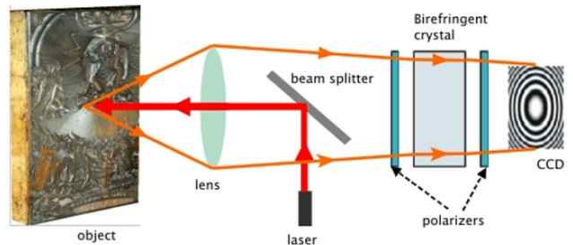


그림 9. Micro-Profilometry

동작원리는 앞에서 언급한 내용과 동일하지만 물체로부터 탐침까지의 거리는 CCD화면에서 얻어지는 프린지의 간격을 측정함으로써 구하는 방식을 취하고 있다.





그림 10. 실험에 사용된 동전. (a), (b)는 그리스시대 동전의 앞면 및 뒷면이며, (c), (d)는 로마시대 동전의 앞면과 뒷면이다.

그림 11은 micro-profilometer로 측정된 실험결과들을 보여주는 그림이다. 그림에서 a, b는 그림 10의 그리스시대 동전의 앞면과 뒷면을 측정된 결과이며, 여기에서 오른쪽이 측정결과이고 왼쪽은 필터링한 결과이다. 그림 11의 오른쪽 d, e는 로마시대의 동전에 대해서 동일한 방법을 이용하여 얻은 그림이다. 아래의 c, e는 측정을 통해 구한 결과를 손으로 재구성해서 나타낸 그림들이다.

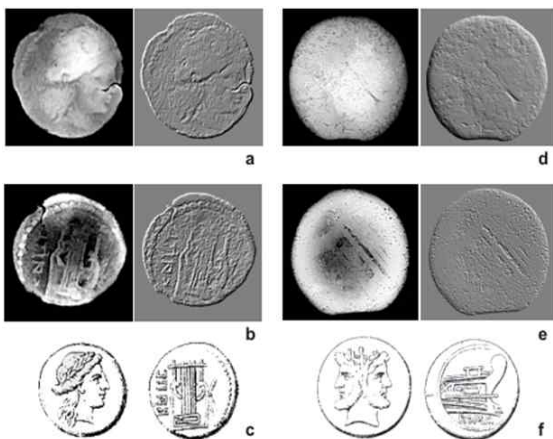


그림 11. 측정을 통해 재구성된 동전의 앞면과 뒷면

### 2.3 프레넬 인코히어런트 상관 홀로그래피 (FINCH : Fresnel incoherent correlation holography)

FINCH 홀로그래픽 시스템은 그림 12 (a)와 같다. 그림에서 3차원 물체가 백색광으로 조명되고, 물체에서 반사된 빛은 렌즈 L과 공간광변조기(SLM)를 통과한 후에 CCD카메라에서 획득된다.

여기서 공간광변조기에서는 격자를 만들어 광분할기 역할을 하도록 되어 있으며, SLM의 반사함수는 상수항과 이차 위상함수의 합으로 표현된다. 그러면 평면파가 SLM에서 반사되면서 평면파와 구면파가 만들어지게 된다.

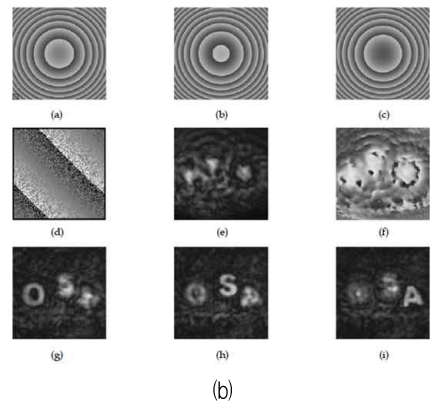
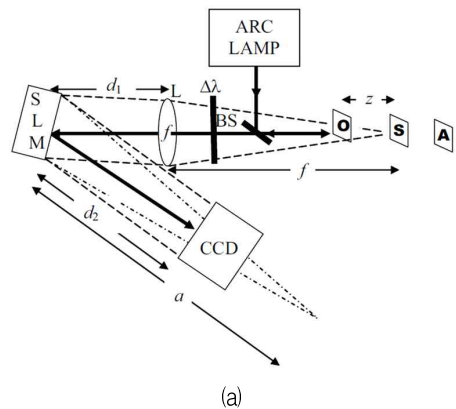


그림 12. FINCH 시스템

따라서 3차원 물체의 점광원에서 생성된 구면파는 SLM에서 두 개의 곡률반경이 다른 구면파를 만들고 CCD에서 두 구면파의 간섭으로 인코히어런트 홀로그래피 생성된다. 이 때 만들어진 홀로그래피는 상수항과 공액영상들의 합이다. 그림 12 (b)는 FINCH 시스템을 이용하여 OSA문자에 대한 홀로그래피를 기록하고 재생한 영상을 보여준다.

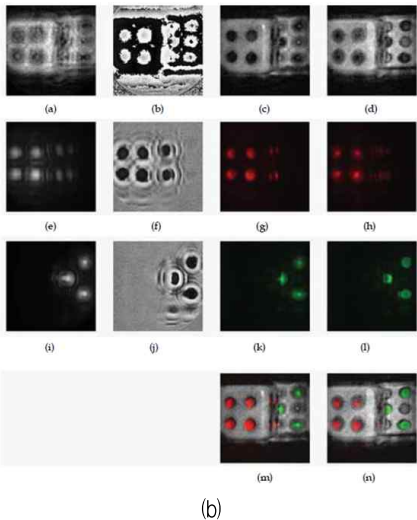
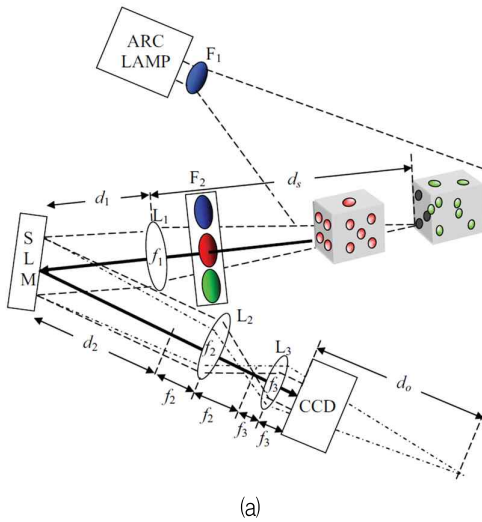


그림 13. 컬러 이미지용 FINCH 시스템

그림 13은 컬러이미지용 FINCH 시스템이다. 이 시스템에서는 RGB에 대하여 각각의 홀로그래피를 기록하고, 이를 재생하여 RGB 복원영상을 합성함으로써 컬러이미지를 구현할 수 있다. 그림 13에서 (a)가 컬러이미지용 시스템이고, (b)는 주사위에 대하여 RGB에 대하여 생성한 홀로그래피, 복원영상 및 합성 컬러이미지를 나타내고 있다.

최근에 FINCH를 활용한 형광현미경은 생물표본에 대한 고해상도의 3차원 형광이미지를 기록하기 위해 개발되었다. 고안된 형광현미경은 그림 14 (a)와 같으며, 대물렌즈에서 나온 빛은 물체에서 반사되고 이 빛은 평면파로 변환된다. 평면파는 SLM에서 반사되며, 홀로그래피를 생성하는 과정은 앞에서 설명한 바와 동일하다. excitation filter는 램프에서 나오는 빛의 파장선택용으로 사용된다. FINCH 현미경은 공간적으로 또는 시간적으로 스캔을 하지 않기 때문에 기존방식보다 양질의 해상도를 가진 홀로그래피를 빠르게 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그림 14 (b)는 FINCH 현미경을 이용하여 홀로그래피를 생성하고, 이를 복원한 영상을 보여준다.

#### 2.4 자기간섭 인코히어런트 디지털 홀로그래피(SIDH)

SIDH는 그림 15와 같이 물체의 한 점에서 나온 빛이 광분할기에서 두 개의 빔으로 나누고, 두 개의 빔은 다른 곡률반경을 가진 미러에서 반사된다. 반사된 두 개의 빔은 광분할기에 의해 합쳐져서 CCD에서 간섭을 일으켜 인코히어런트 홀로그래피를 만드는 방식의 기술이다. 이 방식에서는 한 쪽 미러를 움직여 3개나 4개의 홀로그래피를 구한 다음에 전자적인 조합에 의해 복소홀로그래피를 얻고 있다.

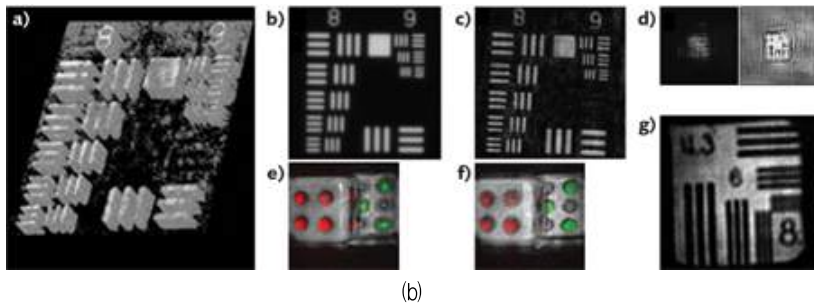
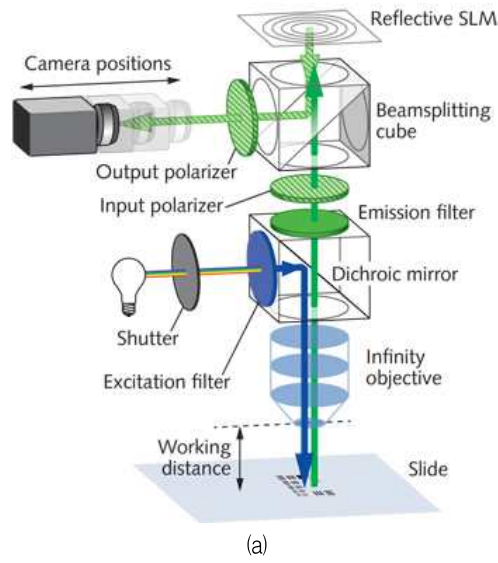


그림 14. FINCH 현미경 및 실험결과

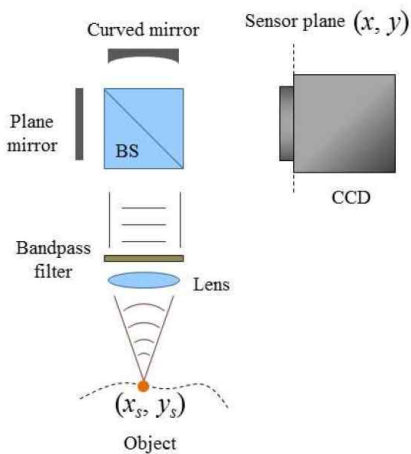


그림 15. SIDH

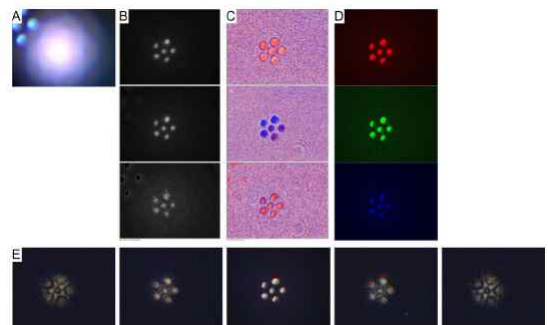


그림 16. SIDH에 의한 홀로그램 생성 및 복원한 결과

그림 16의 B, C, D는 백색 LED 섬광에 대하여 구한 적색(R), 녹색(G), 청색(B) 홀로그램의 진폭,

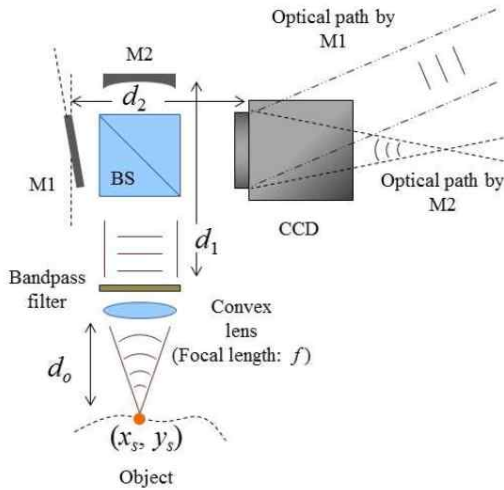


그림 17. 비축(off-axis) SIDH

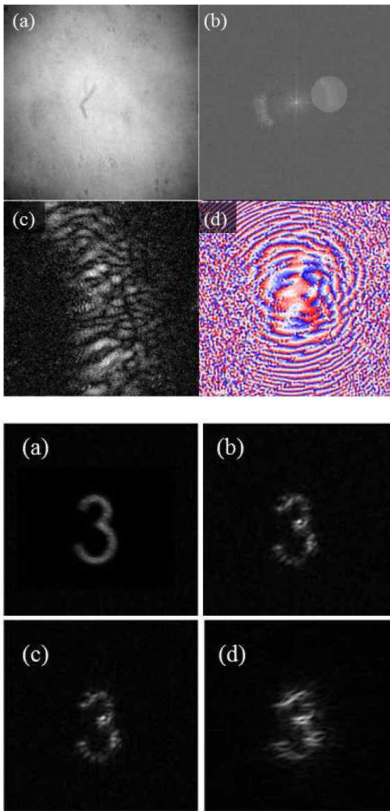


그림 18. 비축 SIDH에 의한 홀로그램 생성 및 복원 결과

위상 및 복원영상을 보여준다. E는 RGB에 대한 홀로그램을 이용하여 복원한 영상을 조합하여 만든 컬러 영상을 초점거리에 따라 나타낸 영상들이다.

그림 15는 동축 인코히어런트 홀로그래픽 시스템이다. 다시 말해서 복원영상에 포함된 잡음을 제거하기 위해서는 위상천이를 이용하는 방식을 취해야 한다. 위상천이를 이용하지 않고 잡음을 제거하기 위해 제안된 시스템이 그림 17의 비축 인코히어런트 홀로그래픽 시스템이다. 그림 15의 동축 시스템과 다른 점은 평면 거울이 수직방향에 대하여 약간 기울어져 있다는 것이다. 이 기울기로 인해 이 시스템에서 기록한 복소홀로그램을 복원하면 위상천이를 하지 않더라도 원하는 영상으로부터 DC항과 공액영상을 분리할 수 있다.

그림 18은 비축 SIDH를 이용하여 기록한 홀로그램으로부터 복원한 영상을 보여준다. 위쪽은 3에 대한 홀로그램이고, 아래쪽은 3이 복원된 영상이다.

### 3. 결론

인코히어런트 홀로그래피는 레이저 홀로그래피에 대한 대안으로 생각되어 꾸준히 연구되어 왔으나 인코히어런트 홀로그래피의 가장 단점중의 하나인 신호대 잡음비가 낮은 문제로 인해 크게 주목을 받지 못하였다. 그러나, 최근에 다양한 방법으로 바이어스와 잡음을 제거할 수 있는 방법이 제시되어 이에 대한 문제가 해결되었다.

최근에는 앞에서 언급된 시스템을 이용하여 RGB에 대한 홀로그램을 생성하고, 이로부터 재생된 영상들을 합성함으로써 컬러이미지를 구현하는 연구가 많이 발표되고 있다. 완전한 3차원 디스플레이를 요건인 입체감과 컬러 이미지 구현이 가능하게 됨으로써, 인코히어런트 홀로그래피가 3차원 디스플레이를 위한 유용한 수단중의 하나가 될 것으로 예상된다. 그리고 기존 방식보다 쉽게 홀로그램을 생성할 수 있는 강



인한 시스템이 발표됨으로써 향후 인코히어런트 홀로그래피의 발전이 가속화되고 응용분야도 넓어질 것으로 생각한다. 예를 들어, 인코히어런트 홀로그래피를 이용하여 유체속에 존재하는 입자의 이동속도의 측정, 눈의 각막수술을 할 때 각막이 제대로 절제되고 있는 지 파악하기 위해 각막의 윤곽 지도 작성 및 거리 측정을 할 수 있으며 또한, 바이오 분야에 적용하는 것도 가능하다.

참고문헌

[1] D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature, vol. 161, pp. 777-778, 1948.  
 [2] L. Mertz and N. O. Young, "Fresnel transformation of optics," in Proceedings of the Conference on Optical Instruments and Techniques, K. J. Habell, ed. (Chapman & Hall, London, 1962) p. 305.  
 [3] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," J. Opt. Soc. Am., vol. 55, no. 11, pp. 1555-1556, 1965.  
 [4] G. Cochran, "New method of making Fresnel transforms with incoherent light," J. Opt. Soc. Am., vol. 56, no. 11, pp. 1513-1517, 1966.  
 [5] P. J. Peters, "Incoherent holograms with mercury light source," Appl. Phys. Lett., vol. 8, no. 8, pp. 209-210, 1966.  
 [6] A. Kozma and N. Massey, "Bias level reduction of incoherent holograms," Appl. Opt., vol. 8, no. 2, pp. 393-397, 1969.  
 [7] W. T. Rhodes, "Bipolar pointspread function synthesis by phase switching," Appl. Opt., vol. 16, no. 2, pp. 265-267, 1977.  
 [8] T.-C. Poon and A. Korpel, "Optical transfer function of an acousto-optic heterodyning image processor," Opt. Lett., vol. 4, no. 10, pp. 317-319, 1979.  
 [9] L. M. Mugnier and G. Y. Sirat, "On-axis conoscopic holography without a conjugate image," Opt. Lett., vol. 17, no. 4, pp. 294-296, 1992.  
 [10] G. W. Stroke and R. C. Reistrick III, "Holography with spatially noncoherent light," Appl. Phys. Lett., vol. 7, no. 9, pp. 229-231, 1965.  
 [11] H. R. Worthington, "Production of holograms with incoherent illumination," J. Opt. Soc. Am., vol. 56, no. 10, pp. 1397-1398, 1966.  
 [12] P. Hariharan and D. Sen, "Effects of partial coherence in two-beam interference," J. Opt. Soc. Am., Vol. 51, No. 11, p. 1307, 1961.  
 [13] S.-G. Kim, K.-T. Kim, B. Lee, and E.-S. Kim, "Removal of bias and the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram," Appl. Opt., vol. 36, no. 20, pp. 4784-4791, 1997.  
 [14] Y. Wan, T. Man, and D. Wang, "Incoherent off-axis Fourier Triangular Color Holography," Opt. Express 심사중.  
 [15] G. Sirat and D. Psaltis, "Conoscopic holography," Opt. Lett., vol. 10, No. 1, pp. 4-6, 1985.

[16] G. Y. Sirat and D. Psaltis, "Conoscopic holograms," Opt. Comm., vol. 65, no. 4, pp. 243-249, 1988.  
 [17] M. Schreiner, M. Strlic, and R. Salimbeni, Handbook on the use of lasers in conservation and conservation science, COST office, Brussels, Belgium, 2008, Chap. 3.  
 [18] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," Opt. Lett. 32(8), pp. 912-914, 2007.  
 [19] J. Rosen and G. Brooker, "Fluorescence incoherent color holography," Opt. Express, vol. 15, no. 5, pp. 2244-2250, 2007.  
 [20] J. Rosen and G. Brooker, "ADVANCES IN IMAGING: Fresnel incoherent correlation holography (FNCH): A different way of 3D imaging" LaserFocusWorld, March 2013.  
 [21] J. Hong and M. K. Kim, "Single-shot self-interference incoherent digital holography using off-axis configuration," Opt. Lett., vol. 38, No. 23, pp. 5196-5199, 2013.  
 [22] M. K. Kim, "Full color natural light holographic camera," Opt. Express vol. 21, no. 8, pp. 9636-9642, 2013.  
 [23] G. Y. Sirat, U.S.Patent No. 5,892,602, 1999.  
 [24] C. Moser and D. Psaltis, U.S.Patent No. 5,909,270, 1999.  
 [25] Jr. Cathey, T. Wade, Jr. Dowski, R. Edward, U.S.Patent No. 5,521,695, 1996.  
 [26] J. Rosen and G. Brooker, "Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy," Nature Photonics 2, pp. 190-195, 2008.

◇ 저 자 소 개 ◇



김수길(金秀吉)

1965년 8월 2일생. 1988년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 호서대학교 공대 디지털제어공학과 교수. 본 학회 이사.