

### 3 차원 결맞음 결상을 위한 파면 접힘 간섭계

오세백<sup>†</sup> · 홍영주\* · 곽윤근\* · 김수현\*

#### Wavefront Folding Interferometer for 3-dimensional Coherence Imaging

Se Baek Oh, Youngjoo Hong, Yoon Keun Kwak, and Soo Hyun Kim

**Key Words :** Wavefront Folding Interferometer (파면 접힘 간섭계), Coherence (가간섭성), van Cittert-Zernike theorem(van Cittert-Zernike 정리)

#### Abstract

The van Cittert-Zernike theorem has been used in radio astronomy. Recently, the van Cittert-Zernike theorem has been tried to 3D source reconstruction. A couple of interferometer has been used in 3D coherence imaging like Michelson Stellar Interferometer and Rotational Shearing Interferometer. We propose a new type of interferometer, which is a wavefront folding interferometer with a corner cube. By characteristics of the corner cube, it is capable of measuring both mutual intensity and cross spectral density function, and it is very easy to align and robust to disturbance. We simulate the feasibility of this interferometer setup by simulation of point source reconstruction.

#### 기호설명

$V(\mathbf{r}, t)$ : 임의의 장(field)의 해석 신호

$J(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ : 상호 강도(mutual intensity),  
 $= \Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau) |_{\tau=0} = \langle V^*(\mathbf{r}_1, t)V(\mathbf{r}_2, t + \tau) \rangle |_{\tau=0}$

$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \nu)$ : 상호 스펙트럼 밀도 함수 (cross spectral density function)  
 $= \langle \tilde{V}^*(\mathbf{r}_1, \nu)\hat{V}(\mathbf{r}_2, \nu') \rangle = W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \nu)\delta(\nu - \nu')$

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구 배경

원격장(far-field)에서의 공간 가간섭성(spatial-coherence)은 공간적으로 비간섭성인 평면 광원 (spatially incoherent planar source)의 강도 분포 (intensity distribution)의 2 차원 푸리에 변환과 비

례한다는 것이 1930 년대에 Van Cittert 와 Zernike 에 의해서 증명되었다[1]. Van Cittert-Zernike 정리를 이용하여 마이켈슨 항성 간섭계(Michelson Stellar Interferometer)[2]를 비롯하여 여러 간섭계가 천문학 분야에서 사용되고 있다[3].

최근에는 3 차원 공간에 분포 되어 있는 광원을 결상하기 위한 시도가 이루어 지고 있다 [4,5,6,7]. 이러한 방법들은 여러 가지 형태의 간섭계를 이용하여 공간 가간섭성을 측정하고, van Cittert-Zernike 정리를 이용하여 광원의 강도 분포를 재생해 낸다. 식 (1)은 Rosen 과 Yariv 에 의해서 일 반화된 van Cittert-Zernike 정리이다[7].

$$J(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \int I_s(\mathbf{r}_s) \exp[jk(R_1 - R_2)] d^3r_s \quad (1)$$

$\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  는 측정면에서 상관 관계를 측정하는 두 점  $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$  의 위치 벡터이며,  $R_1, R_2$  는 광원으로부터  $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$  까지의 거리이다.  $I_s$  는 광원의 3 차원 강도 분포이다. 즉, 간섭계를 이용하여 상호 강도를 측정한 후 역푸리에 변환을 이용하여 광원의 강도를 재생할 수 있다.

Arimoto 는 이와 별도로 상호 스펙트럼 밀도

<sup>†</sup> 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : sebaekoh@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3268 FAX : (042)869-5201

\* 한국과학기술원 기계공학과

함수  $W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \nu)$  의 전파 법칙을 이용하여 광원의 강도를 재생해 내는 것을 제안하였다 [8].

본 논문에서는 두 가지 방법 모두에 적용시킬 수 있는 간섭계로서 코너 큐브를 이용한 파면 접힘 간섭계를 제안하고, 3 차원 상에 분포되어 있는 광원의 강도 분포를 재생할 수 있는지 여부를 모의 실험을 통하여 검증한다.

## 2. 파면 접힘 간섭계

3 차원 가간섭 결상을 위해서는 상호 강도나 상호 스펙트럼 밀도 함수를 측정해야 한다. 이는 모두 공간 가간섭성을 측정하기 위함이고, 이러한 공간 가간섭성을 측정하기 위해서 몇 가지 특정한 간섭계들이 사용되고 있다.

### 2.1 마이켈슨 항성 간섭계

마이켈슨 항성 간섭계는 매우 고전적인 간섭계로서 2 개의 장을 측정할 수 있는 포트 구성되어 있다. 각각의 포트에 입사된 빛을 서로 간섭시켜서 각 포트에 들어온 빛의 상관 관계(correlation)을 측정할 수 있으며, 많은 상관 관계를 얻기 위해서는 2 개의 포트를 주사(scanning)하게 된다.

3 차원 가간섭 결상에 사용함에 있어 장단점으로는 하나의 포트 위치에서 하나의 상관 관계를 측정할 수 있기 때문에, 상관 관계를 측정하는 면에서 많은 측정점을 얻기 위해서는 시간이 많이 소요된다[7].

### 2.2 회전 층밀림 간섭계

회전 층밀림 간섭계[3, 9]는 광선 분할기(beam splitter)에 의해 갈라진 빛을 루프(loop)프리즘이나 도브(dove) 프리즘 등을 이용하여 서로 다른 방향의 회전 층밀림(rotational shearing)을 가해주고 다시 합쳐서 간섭 무늬를 측정한다. 그림 1 은 Marks[7]가 3 차원 가간섭 결상에 사용한 회전 층밀림 간섭계이다. 광속 분할기와 2 개의 루프 프리즘으로 구성되어 있다.

3 차원 가간섭 결상에 사용함에 있어 장점으로는 회전 층밀림에 의해서 상관 관계를 측정하기 때문에 여러 점의 상관 관계를 동시에 측정할 수 있다. 단점으로는 간섭계의 정렬이 매우 어렵다. 특히 회전 층밀림의 각도를 변화시킬 경우에는

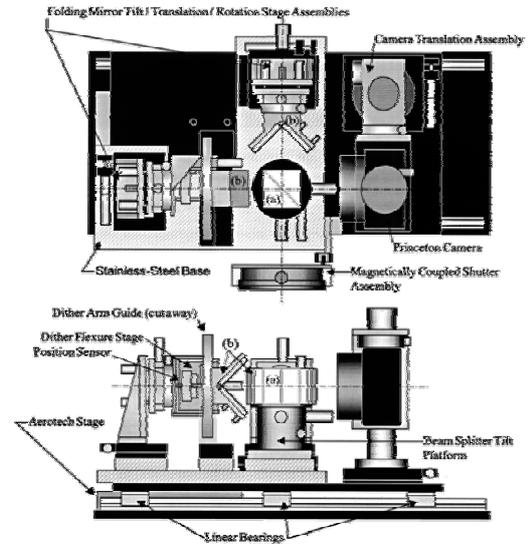


Fig 1 Rotational Shearing Interferometer by Marks [7]

회전 스테이지의 비틀림(wobble)까지 고려해야 하는 단점이 있다.

### 2.3 파면 접힘 간섭계

일반적인 파면 접힘 간섭계는 마이켈슨 간섭계에서 사용되는 2 개의 평면 거울을 1 개의 평면 거울과 1 개의 루프 프리즘으로 대체한 형태이다. 즉, 그림 2 와 같이 평면 거울에서 반사되는 파면과 루프 프리즘에 의해 반사되는 파면이 한 축(루프 프리즘의 대칭축)에 대칭이 되는 성질을 이용한 것이다. 이 간섭계를 이용하여 Arimoto 는 상호 스펙트럼 밀도 함수를 측정하였다[8]. 그러나 이 파면 접힘 간섭계는 한 축에 대해서 대칭이 되므로 한 방향으로만 상관 관계를 측정할 수 있다.

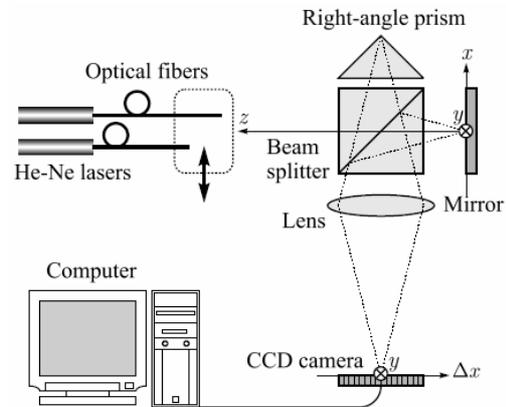
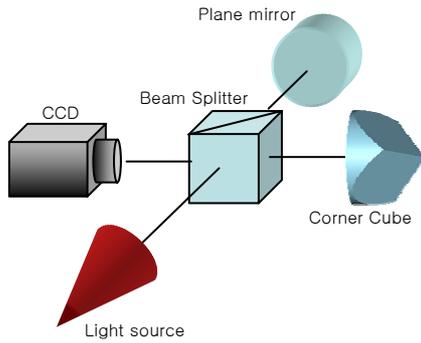
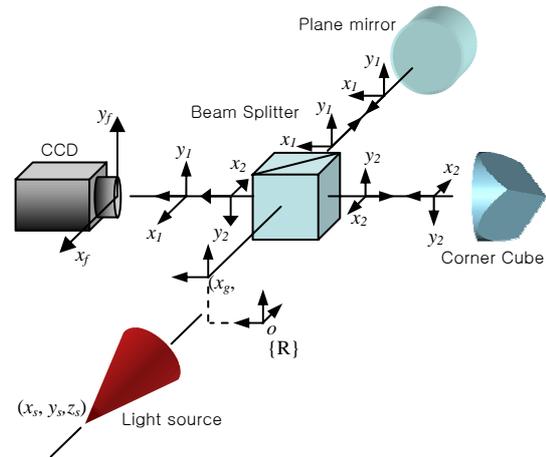


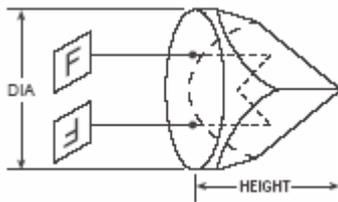
Fig 2 Wavefront Folding Interferometer by Arimoto[8]



**Fig 3 Wavefront Folding Interferometer with Corner Cube**



**Fig. 5 Coordinate of the interferometer**



**Fig 4 Characteristics of Corner Cube [10]**

2.4 코너 큐브를 이용한 파면 접힘 간섭계

본 논문에서는 기존의 파면 접힘 간섭계의 구조에서 루프 프리즘을 제거하고, 그림 3 과 같이 코너 큐브(corner-cube)를 이용하는 형태의 파면 접힘 간섭계를 제안한다. 코너 큐브는 그림 4 와 같이 입사된 파면을 원점 대칭된 형태로 반사 파면을 형성한다[10]. 따라서 2 차원의 상관 관계를 측정할 수 있다. 이 간섭계는 회전 층밀림 간섭계에서 회전 층밀림이 180 도로 고정된 형태이다.

또한 코너 큐브는 평면 거울에 비해서 입사광과 반사광의 진행 방향을 일치시키는 성질이 월등하게 좋다. 따라서 간섭계의 정렬이 쉬우며, 상관 관계 측정 시 간섭계의 이송에 따라 유발되는 기계적인 오차에도 상당히 둔감해지게 되는 장점이 있다.

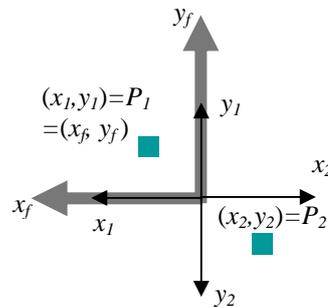
향후 3 차원 결상을 구현하기 위해서는 그림 3 과 같이 간섭계를 구성하여야 하며, 이 간섭계는 광선 분할기, 1 개의 평면 거울과 1 개의 코너 큐브로 구성된다. 코너 큐브는 편광 상태에 따른 내부 전반사에 의한 위상 차이를 제거하기 위하여 프리즘 형태가 아닌 3 개의 반사면을 가진 거울 형태의 코너 큐브를 사용하는 것이 좋다.

3. 3 차원 가간섭 결상의 모의 실험

제안된 파면 접힘 간섭계를 이용한 3 차원 가간섭 결상 수행을 위해, 모의 실험을 통하여 그 타당성을 검증한다. 신호 처리 방법은 Rosen 과 Yariv 의 상호 강도 이용법에 기반을 두었다[7].

3.1 좌표계

사용된 좌표계는 그림 5 와 같다. 간섭계의 입사 동공(entrance pupil) 중심에 간섭계의 위치 좌표  $(x_g, y_g)$ 를 설정했다. 간섭계에 입사한 빛이 광선 분할기에 의해 분리되고 각각 평면 거울과 코너 큐브에서 반사된 후, 다시 광선 분할기에 의해 중첩된다. 평면 거울을 지나온 파면의 좌표계를  $x_1y_1$ , 코너 큐브를 지나온 파면의 좌표계를  $x_2y_2$ 라고 하면 이 두 좌표계는 그림 6 과 같이 원점에 대해서 대칭 또는 180° 의 회전 층밀림이 유발된 상태와 동등하다. 광 검출기의 중심에  $x_f, y_f$  좌표계를 설정하면, 임의의  $x_f, y_f$  점에서 측정되는 상관 관계는 결국 그림 6 의 P1, P2 두 점의 상호 관계이다.



**Fig. 6 Coordinate relation on CCD plane**

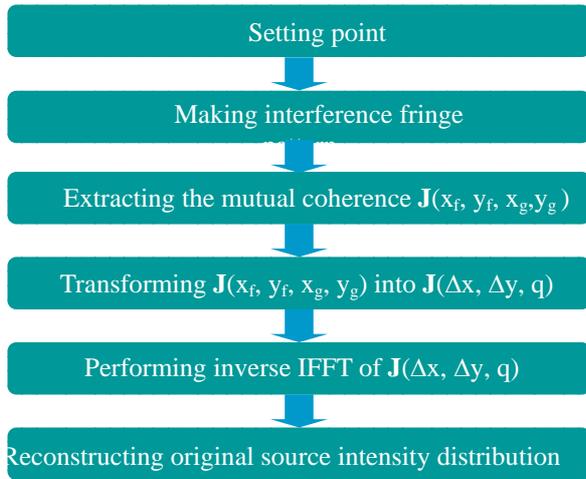


Fig. 7 Simulation Procedure

3.2 모의 실험 과정

모의 실험의 전체적인 과정은 그림 7 과 같다. 간섭계의 앞쪽에 점광원을 설정한다. 점광원으로 부터 진행한 빛이 간섭계를 지나 광 검출기 상에 발생시키는 간섭 무늬를 계산한다. 또한 간섭계를 이송시키면서, 즉, 여러 개의  $x_g, y_g$  값에서 간섭 무늬를 계산하여 보다 많은 점에서의 상관 관계를 얻어낸다. 측정된 간섭 무늬를 분석하여 상호 강도를 얻는다. 이때 상호 강도는  $\Delta x, \Delta y, q$  의 3 차원 좌표의 데이터다. 이 상호 강도를 3 차원 역푸리에 변환을 거치면 본래 광원의 강도 분포를 얻어 낼 수 있다.

3.3 모의 실험 결과

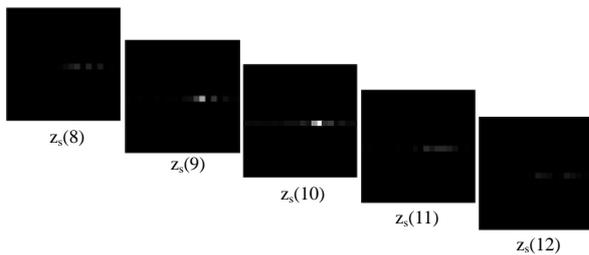


Fig. 8 Simulation Result

그림 8 은 광원의 위치가 간섭계로부터 (0.005, 0, 1) m 떨어진 위치에 있을 때의 결과이다. 상호 강도가 3 차원 배열이기 때문에 역푸리에 변환을 거친 강도 분포도 3 차원 배열을 얻게 된다. 이 3 차원 강도 분포를 z 축 (간섭계에 입사하는 빛의 광축)에 수직인 방향으로 절단하여 그 단면을 표

시한 것이다.

z 축의 인덱스 값이 10 일 때 점광원이 잘 재생되고, 다른 z 값의 경우에는 점광원이 재생되지 않는 것을 볼 수 있다. 인덱스 값이 10 인 이유는 역푸리에 변환하여 재생된 강도 분포 데이터 배열의 z 축이 20 픽셀이므로, 그 중심인 10 번째 픽셀이 광원의 위치이기 때문이다.

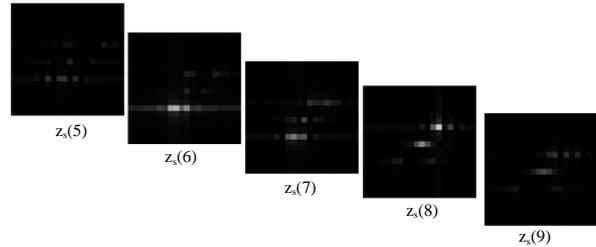


Fig. 9 Simulation Procedure

그림 9 는 서로 다른 위치  $((x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})=(0.003, 0.003, 0.6)m, (x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})=(-0.0005, -0.001, 0.2)m$  에 두 개의 점광원을 위치 시키고 같은 모의 실험을 한 결과이다. 앞서의 결과와 마찬가지로 특정한 위치에서 각각의 점광원이 재생된 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 3 차원 가간섭 결상에 대해서 간략히 소개하고, 기존의 3 차원 가간섭 결상에 사용된 마이켈슨 항성 간섭계, 회전 층밀림 간섭계, 파면 접힘 간섭계와는 달리 코너 큐브를 이용한 파면 접힘 간섭계를 제안하였다.

제안된 파면 접힘 간섭계는 광선 분할기와 1 개의 평면 거울, 1 개의 코너 큐브로 구성된다. 간섭을 발생시키는 두 파면은 서로 원점 대칭을 이루게 되며, 따라서 x, y 평면에서 상호 강도와 상호 스펙트럼 밀도 함수를 측정할 수 있다. 또한 코너 큐브의 특성상 정렬이 매우 쉬우며, 외란에도 강인하게 되므로 가간섭 결상의 실제 구현 시 장점을 갖는다.

제안된 파면 접힘 간섭계의 구조를 이용하여 단일 점광원의 강도 분포를 재생하는 모의 실험을 수행하였다.

향후 실제 시스템 구현을 통하여 제안된 파면 접힘 간섭계의 결상 능력에 대한 구체적인 분석과 3 차원 결상에의 적용을 진행할 예정이다.

## 후 기

본 논문은 BK21 사업의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- (1) J. W. Goodman, 1985, *Statistical Optics*, Wiley
- (2) A. A. Michelson, 1890, On the application of interference methods to astronomical measurements, *Philosophical Magazine*, Vol. 30, No. 1,
- (3) F. Roddier, 1988, Interferometric imaging in optical astronomy, *Phys. Rep.* Vol. 170, pp.92-166
- (4) J. Rosen and A. Yariv, 1996, Three-dimensional imaging of random radiation sources, *Optics Letter*, vol. 21, No. 14, pp.1011-1014
- (5) J. Rosen and A. Yariv, 1996, General theorem of spatial coherence: Application to three-dimensional imaging”, *Journal of Optical Society America A.* vol. 13, No. 10, pp.2091-2095
- (6) J. Rosen and A. Yariv, 1996, Reconstruction of longitudinal distribution incoherent sources, *Optics Letters*, Vol. 21, No. 22, pp.1803-1805
- (7) D. L. Marks, R. A. Stack and D. J. Brady, 1999, Three-dimensional coherence imaging in the Fresnel domain, *Applied Optics*, Vol. 38, No. 8, pp.1332-1342
- (8) H. Arimoto, K. Yoshimori, K. Itoh, 1999, Retrieval of the cross-spectral density propagating in free space, *Journal of Optical Society America A.* vol. 16, No. 10, pp.2447-2452
- (9) M.V.R.K. Murty and E.C.Hagerott, 1966, Rotational-Shearing Interferometry, *Applied Optics*, Vol. 5, No. 4, pp.615-619
- (10) <http://www.newport.com>