

## Shack-Hartmann 파면측정 장치의 보정

### Calibration of Shack-Hartmann wavefront sensor

서영석, 백성훈, 박승규, 차병헌  
한국원자력연구소 양자광학기술개발부  
ex-sys@kaeri.re.kr

적응광학(AO ; adaptive optics) 시스템의 중요한 구성요소인 파면측정 장치(wavefront sensor)는 변형거울(deformable mirror)과 제어용 컴퓨터에 연결되어 파면보정을 실시간으로 처리할 수 있도록 파면의 왜곡정보를 제공한다. 제작된 Shack-Hartmann 파면측정 장치는 배열렌즈(array lens), 빔 축소 광학계, CCD 카메라 등으로 구성되어있는데, 측정된 파면의 정보는 영상처리 보드가 내장된 제어용 컴퓨터를 사용하여 분석한 뒤 실시간으로 보정장치를 구동할 수 있도록 설계되었다. 본 실험실에서 설계, 제작된 Shack-Hartmann 파면측정 장치를 사진 1에 보였으며 사용된 광학계들의 사양을 표 1에 정리하였다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 설계, 제작된 Shack-Hartmann 파면측정 장치를 최적화하기 위하여 광학계의 정렬과 파면재구성에 따른 보정요소들을 계산하였다. 보정요소들은 전산시뮬과 실험을 통해서 구하였는데, 구성된 적응광학계를 사용하여 결과를 비교/분석하였다.

Shack-Hartmann 파면측정 장치의 최적화를 위한 기준파면으로는 He-Ne 레이저의 잘 정렬된 빔을 사용하였으며, 임의의 왜곡을 가할 수 있도록 하였다. 정렬된 레이저빔이 배열렌즈에 입사하게 되면 작은 렌즈들의 초점면에서 각각의 렌즈에 대한 점 영상들이 형성된다. 점 영상들은 CCD 카메라를 통해서 영상처리보드에 저장되고, 제어용 컴퓨터는 각각의 점 영상에 대한 서브픽셀 분해능의 중심점을 찾아서 기준파면의 정보를 구성하여 저장한다. 임의의 왜곡된 파면을 입사시키면 왜곡 정도에 따라 x축과 y축으로 점 영상의 이동이 나타난다. 이때 기준파면과 왜곡파면의 점 영상에 대한 x축과 y축으로의 변위  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 를 계산한다.

위상이  $\phi$  인 레이저의 파면이 초점거리가  $f$  인 배열렌즈에 입사될 때, 초점면에서 x축 방향의 점 영상의 변위  $\Delta x$  를 측정한다면, 국소 파면의 기울기  $\theta$  는 다음 식과 같다.<sup>(2)</sup>

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{\Delta x}{f} \quad (1)$$

그리고 빔 축소 광학계와 영상중계렌즈의 배율에 따라 빔의 크기가 바뀌게 되는 관계를 고려하면 실제 계산되어지는 x축 방향에서의 파면 기울기  $s^x$  는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s^x = \frac{m_e \Delta x}{m_i f} \quad (2)$$

여기에서,  $m_e$  는 빔 축소 광학계의 배율이고,  $m_i$  는 영상중계렌즈의 배율이다.

계산된 기울기 정보로부터 파면을 재구성하기 위해서는 재구성에 따른 오차를 최소화 할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 즉, Shack-Hartmann 파면측정 장치로부터 측정되어지는 파면의 기울기 정보로부터 재구성되는 위상 점의 위치를 일치시키기 위해 측정하는 파면의 특성에 따라 적절한 알고리즘을 사용할 필요가 있다. 파면측정 장치로부터 계산된 기울기  $s^x$ ,  $s^y$  정보의 선형적인 관계로부터 행렬 방정식을

다음과 같이 정의할 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$s = [A]\phi \tag{3}$$

여기에서,  $\phi$ 는 위상을 나타내고,  $s$ 는 측정된 기울기의 정보이다. 그리고  $A$ 는 x축과 y축 방향에 대한 기울기의 모든 정보와 연결되는 파면재구성을 위한 행렬이다. 수치계산용 소프트웨어인 메스메티카를 사용하여 행렬  $A$ 를 구성하였고, 위상  $\phi$ 를 결정하기 위한 행렬  $A$ 의 유사역행렬  $A^+$ 을 특이값분해(SVD; singular value decomposition)방법을 사용하여 계산하였다. 유사역행렬  $A^+$ 를 사용하여 위상 값을 결정할 수 있게 된다.

본 연구는 실험실에서 설계/제작된 Shack-Hartmann 파면측정 장치의 측정 정밀도를 향상시키고, 파면재구성에서 나타나는 오차를 최소화하기 위한 보정요소들을 찾아내어 측정된 파면의 정보를 정확하게 나타내고자 하였다. 이를 위하여 Shack-Hartmann 파면측정 장치로 측정된 기준파면의 측정 정밀도를 살펴보고, 측정된 점 영상의 x축과 y축 변위로부터 기울기를 계산하기 위한 보정요소를 식 (2)로부터 정의하였으며, 지역계산(zonal estimation)에 의한 파면재구성에서 재구성행렬의 가중치에 대해서도 연구하였다. 기준파면의 점 영상들에 대한 서브픽셀 분해능의 중심점 추출로부터 측정값은 0.1 픽셀 이내에 있었고 표준편차는 0.02 픽셀이었다. 구성된 적응광학 시스템으로부터 기울기(tilt)가 적용된 파면으로부터 기울기와 위상 값을 결정하기 위한 보정요소들을 구하였다. 또한, 임의의 파면 왜곡에 대해서 보정요소들을 적용하여 전산시뮬에 의한 결과와 비교 분석하였다.

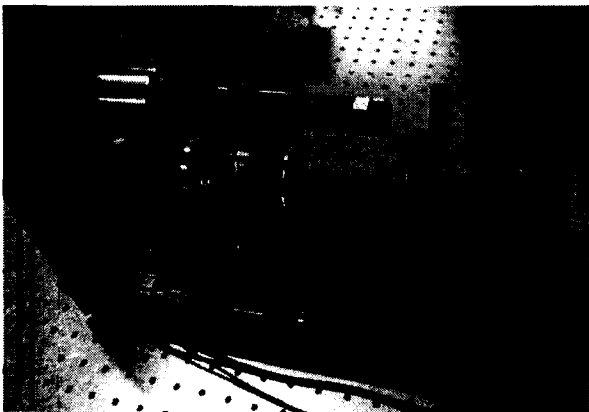


사진 1. Shack-Hartmann 파면측정 장치

배열렌즈	Monolithic Lenslet module, 14x14 lenslet, f45mm, pitch:500 $\mu$ m material:BK7, dimension:7x7mm
CCD 카메라	PULNIX TM7-CN, RS-170, IT type, 768x494 pixel, cell size 8.4x9.8 $\mu$ m
빔 축소 광학계	Doublet $\phi$ 60mm, f300mm, BK7SF5
	PCV $\phi$ 25.4mm, f-40mm, BK7
영상중계 렌즈	Telecentric f55mm, F/2.8

표 3. Shack-Hartmann 파면측정 장치의 특성

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- 1 Young-Seok Seo, Sung-Hoon Baik, Seung-Kyu Park and Cheol-Jung Kim, "Closed-Loop Adaptive Optics System for Wave-Front Correction," J. Korean Phys. Soc., 39(5), 891(2001).
- 2 J. S. Toppen, E. S. Bliss, T. W. Long, J. T. Salmon, "A video Hartmann wavefront diagnostic that incorporates a monolithic microlens array," SPIE Proc., 1544, 218(1991).
- 3 Jan Herrmann, "Least-squares wave front errors of minimum norm," J. Opt. Soc. Am., 70(1), 28(1980).