

# 파면보정을 위한 적응광학계의 Modal 제어

## Modal Control of Adaptive Optical System for Wavefront Correction

서영석\*, 백성훈, 박승규, 김철중, 양준목\*

\*충남대학교 물리학과, 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

ex-sys@kaeri.re.kr

적응광학계(adaptive optics system ; AO)는 파면을 파면측정장치로 측정하고 제어용 컴퓨터를 사용하여 파면보정장치를 구동함으로써 파면의 왜곡 및 수차를 보정하는 장치로, 최근 천문학 및 의료분야에서 활용되고 있다. 적응광학계의 제어는 파면을 영역별로 나누어 제어하는 zonal 방법과 모드로부터 제어하는 modal 방법이 있다. 본 연구에서는 파면 측정 장치(wavefront sensor ; WFS)인 Shack-Hartmann sensor로 측정된 파면의 기울기 정보로부터 Zernike 다항식의 계수를 계산하여 수차의 정보를 구현하고, 왜곡된 파면을 실시간으로 보정하기 위하여 Zernike 계수로부터 위상을 재구성한 후 보정장치인 변형거울을 제어하는 방법으로 파면을 보정하였다.

Zernike 다항식으로부터 파면수차를 표현하기 위해서는 Zernike 다항식의 계수를 계산하여 파면의 정보를 나타낼 수 있는데, 식 (1)은 이들의 관계를 나타내어 준다.

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^L c_i Z_i(x, y) \quad (1)$$

여기에서  $W$ 는 파면수차이고,  $Z_i$ ,  $c_i$ 는 Zernike 다항식과 계수를 의미한다.

Shack-Hartmann WFS에서 측정되어지는 파면의 기울기  $s(x, y)$ 로부터 Zernike 다항식의 계수  $c_i$ 를 구하기 위해서 Zernike 다항식을 미분하면 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$s(x, y) = \sum_{i=1}^L c_i \nabla Z_i(x, y) \quad (2)$$

식 (2)를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[s] = [D] [c] \quad (3)$$

여기에서 행렬  $D$ 는 Zernike 다항식을  $x$ 와  $y$ 로 편미분하여 구성된 행렬이다. 이 식은 최소제곱법의 최소 노름  $\|Dc - s\| = \min$ 을 만족해야한다. 본 실험에서는 배열  $12 \times 12$ 인 lenslet을 사용하였는데 원형의 파면에 대한  $x$ 축과  $y$ 축의 기울기 측정 영상점 수는 240개 이고, Zernike 계수의 수는 36이다. Zernike 다항식을  $x$ 와  $y$ 로 편미분하여 구성한 행렬  $D(240 \times 36)$ 를 만들고, WFS로 측정된  $x$ 축과  $y$ 축에 대한 기울기정보  $s(240 \times 1)$ 와 연결하여 Zernike 계수  $c(36 \times 1)$ 를 구한다. 식 (3)으로부터 Zernike 계수  $c$ 는 행렬  $D$ 를 singular value decomposition (SVD) 방법으로 재구성하여 역행렬  $D^{-1}$ 로부터 계산할 수 있는데 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$[c] = [D]^{-1} [s] \quad (4)$$

파면을 보정하기 위해서는 파면 보정장치인 변형거울의 influence function으로부터 왜곡된 파면의

Zernike 계수를 이용하여 변형거울에 인가해야할 전압을 계산하여 구현할 수 있다. 변형거울에 전압  $V_i$ 를 인가하여 각 작동기(actuator)에 대한 기울기 influence function  $B_i$ 를 구할 수가 있는데, 전압의 인가에 따른 변형거울의 형상은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$s(x, y) = \sum_{i=1}^N V_i B_i(x, y) \quad (5)$$

여기에서  $N$ 은 변형거울의 작동기 개수이다. 또한, 식 (5)는 Zernike 다항식과 계수로부터 파면의 정보를 나타내는 식 (2)와 같으므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N V_i B_i(x, y) = \sum_{i=1}^N c_i \nabla Z_i(x, y) \quad (6)$$

이들의 관계를 행렬식으로 표현하면 다음 식과 같고,

$$[B][V] = [D][c] \quad (7)$$

구하고자하는 변형거울의 인가 전압은 influence function의 역행렬  $B^{-1}$ 을 SVD 방법으로 계산하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$[V] = [B]^{-1} [D][c] \quad (8)$$

본 연구에서는 실험실에서 구성한 적응광학계<sup>(2)</sup>를 사용하여 임의의 파면에 대한 왜곡 및 수차 정보를 Zernike 계수를 얻음으로써 정량화 하였으며, 계산된 Zernike 다항식과 계수로부터 모드 제어 방식으로 왜곡된 파면을 실시간으로 보정하였다. 그림 1에 임의의 왜곡된 파면에 대한 보정실험 결과를 나타내었는데, (a)는 임의의 왜곡된 파면이고 (b)는 보정에 대한 결과이다. 왜곡된 파면의 P-V값은 1.55파장이고, 2차 보정후의 P-V값은 0.17파장으로 89%보정되었다.

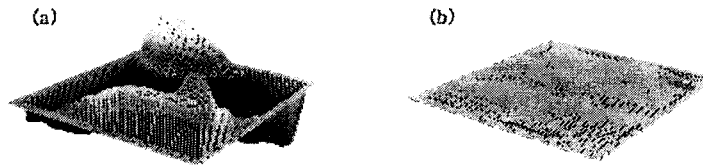


그림 1. 임의의 왜곡된 파면에 대한 보정실험 결과  
(a) 왜곡된 파면 (b)보정후의 파면

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, Academic Press, New York(1998).
2. 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)