지역/모드제어에서의 커플링계수를 이용한 적응광학계의 폐회로 제어 알고리즘

Closed-loop Control of Adaptive Optical System using Coupling Factor of Zonal and Modal Control

서영석, 백성훈, 박승규, 김삼, 박준식, 김철중, 양준묵*
한국원자력연구소 양자광학기술개발부, *충남대학교 물리학과
ex-sys@kaeri.re.kr

적응광학(Adaptive optics, AO)계에서 왜곡된 파면을 폐회로 보정하기 위해서는 파면측정 장치와 파면보정 장치인 변형거울의 상관관계를 찾고 보정신호를 제어해주는 알고리즘이 필요하다. 일반적으로 적응광학계를 제어하는 방법을 지역(Zonal)제어와 모드(Modal)제어로 나눌 수 있다. 지역제어는 파면을 영역별로 나누어 파면보정 장치의 각 구동소자 위치에 대응하는 신호를 발생하여 제어하는 방법이고, 모드제어는 파면의 정보를 Zernike 다항식과 같은 일정한 기저함수들의 선형 합으로 표현한 뒤 각 모드에 해당하는 제어신호를 발생하여 전체 파면을 제어하는 방법이다. 본 논문에서는 지역제어와 모드제어에서 변형거울의 특성함수인 기울기영향함수 행렬과 파면모드를 가지는 Zernike 편미분 다항식 행렬로부터 커플링 요소가 포함된 새로운 영향함수를 구성하여 적응광학계를 제어하였다. 제안된 알고리즘은 파면측정에서 나타날 수 있는 고주파수의 유입에 따른 노이즈 보상에 뛰어나고, 보정 속도는 느리지만, 파면의 왜곡이 빠르지 않은 경우 보정효율이 향상되는 결과를 얻었다.

폐회로 파면보정에서 n차 보정을 수행할 경우에 왜곡된 파면의 위상을 ϕ_{n-1}, 측정된 왜곡정보로부터 제어신호를 계산한 뒤 변형거울을 구동하여 보상한 위상을 $\phi_{c(n-1)}$, 그리고 보정된 파면을 파면측정 장치로 측정했을 때의 위상을 ϕ_n이라고 하면 이들의 관계는 다음 식과 같다.[1]

$$\phi_n = \phi_{n-1} - \phi_{c(n-1)} \tag{1}$$

모드제어에 의한 파면 보정을 수행한 경우, 식 (1)에서 보정 전후의 위상 관계를 Zernike 다항식 계수 c를 사용하여 표현할 수 있으므로

$$c_n = c_{n-1} - c_{c(n-1)} \tag{2}$$

이고, 식 (2)는 지역제어와 모드제어에 대한 기본 정의로부터 다음 관계식으로 유도할 수 있다.

$$c_n = (I - D^+ BB^+ D)c_{n-1} \tag{3}$$

여기에서 B와 D는 기울기영향함수 행렬과 Zernike 편미분 다항식 행렬을 나타내고, B^+와 D^+는 이들의 유사역행렬이다. 식 (3)에서 $M_M \equiv (I - D^+ BB^+ D)$을 모드제어 커플링요소로 정의할 수 있는데, $BB^+ \neq I$의 조건으로부터 대각행렬이 아니므로 보정 전과 후의 파면에 대한 모드제어와 지역제어를 연결하는 중요한 요소가 될 수 있다. 폐회로 모드제어 관계식에 왜곡된 파면에 대한 Zernike 다항식

의 계수와 모드제어 커플링요소를 대입하여 정리하면 다음식과 같이 정리할 수 있다.

$$V_n = B^+ D c_n = B^+ D M_M^+ c_{n-1} \tag{4}$$

여기에서 V_n 은 변형거울에 인가되는 전압이다. 식 (4)에서 새로운 영향함수를 $B_M \equiv B^+ D M_M^+$ 으로 정의하면, 다음 식으로부터 폐회로 파면보정을 실행 할 수 있다.

$$V = B_M c \tag{5}$$

지역제어에 의한 파면 보정을 수행한 경우, 보정 전후의 위상 관계식 (1)을 지역제어에 의한 폐회로 보정에서는 변형거울 구동전압의 관계로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = V_{n-1} + V_{c(n-1)} \tag{6}$$

식 (6)은 지역제어와 모드제어에 대한 기본 정의를 사용하여 다음 관계식을 유도할 수 있다.

$$V_n = (I + B^+ D D^+ B) V_{n-1} \tag{7}$$

식 (7)에서 $DD^+ \neq I$의 조건으로부터 행렬 $M_Z = (I + B^+ D D^+ B)$ 을 지역제어 커플링요소로 정의할 수 있다. 그러면 식 (7)은 폐회로 지역제어 관계식에 왜곡된 파면에 대한 변형거울 구동전압과 지역제어 커플링요소를 대입하여 다음 식과 같이 정리할 수 있다.[2]

$$V_n = M_Z B^+ s_{n-1} \tag{8}$$

여기에서 s_{n-1} 은 측정된 파면의 기울기 정보이다. 식 (8)에서 새로운 영향함수를 $B_Z = M_Z B^+$로 정의하면, 다음 식으로부터 폐회로 파면보정을 실행 할 수 있다.

$$V = B_Z s \tag{9}$$

지역제어와 모드제어의 커플링요소를 포함하는 식 (5)와 (9)를 사용하여 구성된 적응광학계의 폐회로 구동을 통해서 임의의 파면에 대한 보정 실험과 전산시늉의 결과를 비교/분석하였다. 전산시늉 결과는 제안된 지역/모드제어 알고리즘을 사용하면, 최대보정에 이르는 시간은 길어지지만 보정효율이 향상될 것으로 예측되었지만 계속적으로 변화되는 실험실 내부의 공기 유동이나 외부 진동을 제외한 결과이므로 실제 실험에서는 보정 정밀도의 향상은 크지 않았다. 실험 결과로부터 제안된 지역/모드제어 알고리즘은 파면 보정의 속도가 느리다는 단점에도 불구하고, 외부 노이즈의 영향에 둔감하여 안정된 보정 값을 유지하기 때문에 느린 속도로 왜곡이 형성되는 경우에는 적합한 알고리즘이라고 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. X. Li, C. Wang, H. Xian, X. Wu, W. Jiang, "Zernike modal compensation analysis for an adaptive optics system using direct-gradient wavefront reconstruction algorithm," Proc. SPIE, 3762, 116(1999).
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).