2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

레이저 파면보정을 위한 적응광학계 개발

Development of adaptive optics system for laser wavefront correction

백성훈, 박승규, 김민석, 정진만, 김철중
한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

적응광학계는 레이저 빔 파면 보정과 같이 빛의 파면을 제어하는 기술로, 원자분광 레이저 장치에 사용된다. 본 연구에서는 분광 레이저빔 파면보정을 위하여 파면측정 센서, 파면보정용 다채널 변형거울, 그리고 제어장치로 구성된 적응광학계를 개발하였다. 본 논문에서는 각 적응광학계 장치의 구성과 폐루프 레이저 빔 파면 보정 알고리즘을 기술하였다. 개발된 장치로 폐루프 실시간 레이저 빔 파면 보정 실험을 수행한 결과, 5.8 파장의 파면왜곡을 거의 10분의 1 수준인 0.6 파장의 왜곡으로 보정할 수 있었다.

Abstract

Adaptive optics system is widely used to wavefront compensation for laser beam clean-up. We developed an adaptive optics system which consist of a Shack-Hartmann wavefront sensor, a multi-channel deformable mirror and a control computer, for atomic spectroscopic laser system. In this paper, the instrumentation of the adaptive optical system and the closed-loop wavefront correction algorithm are described. Also, the experimental results of closed-loop wavefront correction are presented. A distorted laser wavefront of 5.8 wavelengths of P-V values was corrected to 0.6 wavelengths of P-V values.

1. 서 론

적응 광학(adaptive optics) 장치는 변형된 파면을 파면측정 센서로 측정하고, 변형거울(deformable mirror)등의 파면보정 장치를 사용하여 파면을 보정하는 기술로[1], 초기에는

위성 인식 등 군사 목적에서 개발되었으며 현재는 군사용이나 천체망원경, 그리고 레이저 분광 분야에 사용되고 있다[2]. 레이저 분광 장치에서 레이저빔은 분광 매질 속을 장거리 진행하는데, 레이저빔의 파면이 심하게 왜곡되어 있는 경우 레이저빔이 전파될수록 공간 분포의 불균일이 심하게 되어 분광 효율을 떨어트리는 주요 원인이 된다. 따라서 적응광학계를 사용하여 레이저빔의 파면을 보정하여 줌으로써 분광 효율을 높일 수 있다. 한국원자력연구소에서는 이러한 레이저빔의 파면왜곡을 보정하기 위하여 Shack-Hartmann 방식의 파면측정 센서와 미소변위 작동기(actuator)를 사용하는 변형거울, 그리고 파면제어 컴퓨터로 구성되어 레이저빔 파면의 왜곡상태를 폐회로(closed-loop) 방식으로 보정하는 적응광학 시스템을 개발하였다. 본 논문에서는 분광 레이저빔 파면보정을 위하여 개발한 적응광학계의 특성과 실제 파면 보정 성능에 대해 기술한다.

2. 적응광학 장치개발

개발된 적응광학 실험 장치는 그림1과 같이 변형거울과 파면측정센서, 분석 및 제어용 컴퓨터 등으로 구성되었다. 실험용 광원으로 He-Ne 레이저를 사용하였고 멤브렌인 방식의 다른 변형거울을 사용하여 인위적인 파면왜곡을 인가하였다. 변형거울의 작용함수(influence function)를 구하고, 파면왜곡 상태를 감시하기 위하여 간단한 Fizeau 간섭계를 실험장치에 포함하여 장치를 구성하였다.

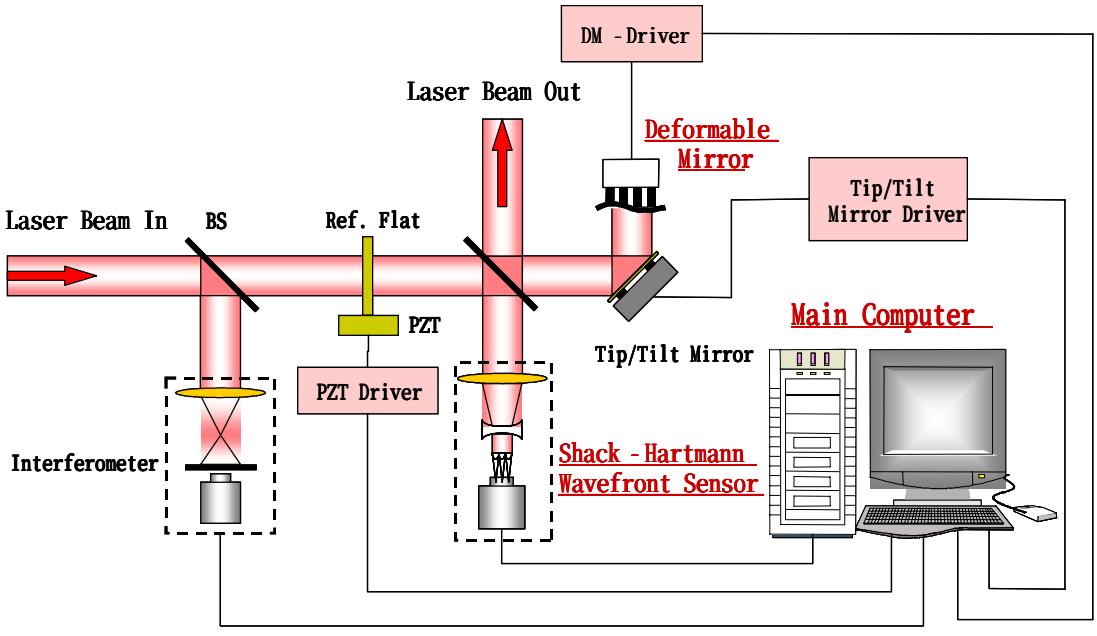


Fig. 1. Schematic diagram of closed-loop adaptive optics system.

파면의 왜곡 정도를 측정하기 위한 파면왜곡 측정 센서는 Shack-Hartmann 방식[3]으로, 그림 2와 같이 국부적인 파면 기울기를 측정하여 파면왜곡 정도를 측정하는 원리를 갖는다. 실제 장치는 monolithic 방식의 lenslet array와 RS-170 방식의 CCD 카메라, 그리고 영상중계렌즈와 영상처리 장치로 구성된다. Lenslet array는 초점거리가 45mm이고, 구경이 500um인 에폭시 마이크로 렌즈가 7x7mm 크기에 정방형으로 14x14개 배열되어 있다. CCD 카메라는 interline transfer 방식이며, 640×480 픽셀을 영상처리 보드에서 획득하여 처리하였다.

레이저빔에 의해 형성된 파면이 lenslet array에 입사되면 각각의 마이크로 렌즈에 의해 나누어지고, lenslet array의 초점 면에서 각각의 점(spot) 영상은 파면의 국소적인 파면 기울기의 양에 비례하여 이동된다. 초점 면에서 점 영상의 변위는 CCD 카메라로 기록되고 중심점 추출 알고리즘에 의해 계산된다. 파면의 국소적인 경사를 결정한 후, 수직, 수평 방향에서의 기울기를 최소제곱법 방식으로 통합하여 전체 위상을 재구성한다[4,5].

파면 센서의 정밀도는 각각의 점 영상의 중심 추출 정밀도에 크게 의존한다. 개발된 장치에서는 각각의 점 영상에 대해 26x26 픽셀의 창을 설정하고 픽셀 단위로 대략적인 중심 위치를 찾고, 다시 이를 중심으로 5x9창과 9x5창을 설정하여 소수점 단위로 중심점을 다시 추출하는 방식을 사용하였다. 찾아낸 중심점 주변으로 보간법을 사용하여 정확한 위치를 결정하였다.

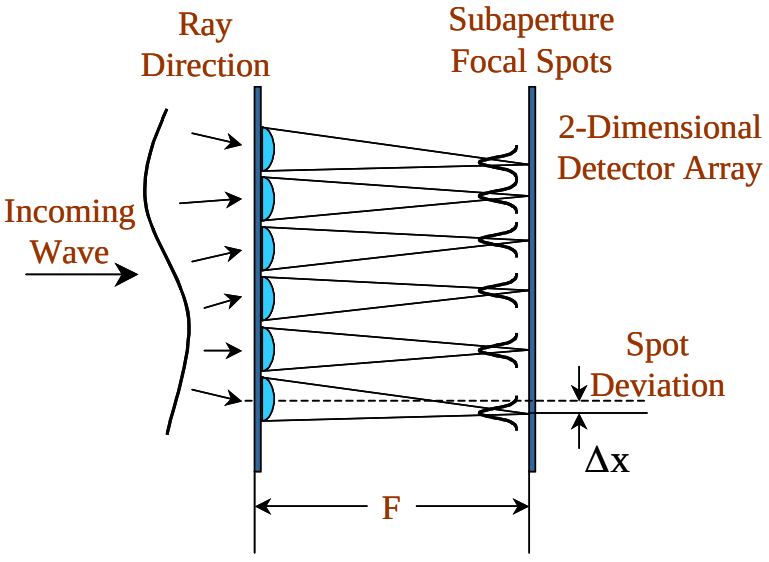


Fig.2 Principle of Shack-Hartmann wavefront sensor

파면 보정 장치로는 37 채널의 변위 작동기(actuator) 변형거울을 사용하였는데, 자체 개발한 PZT 변형거울과 Xinetics 사 제품의 PMN 변형거울을 사용하였다. 자체 개발한 변형거울은 유효 구경이 55 mm인 BK7 거울면을 사용하였고 표면은 dielectric 전반사 코팅을 하였다. PMN 변형거울은 지름이 42mm 이며, 각 작동기의 최대 변위는 5 μm이다. 그림 3은 각 작동기에 전압을 가했을 때의 변형량, 즉 작용함수(influence function)로 37 채널의 변형량을 모두 측정하여 파면제어를 위한 정보로 사용된다.

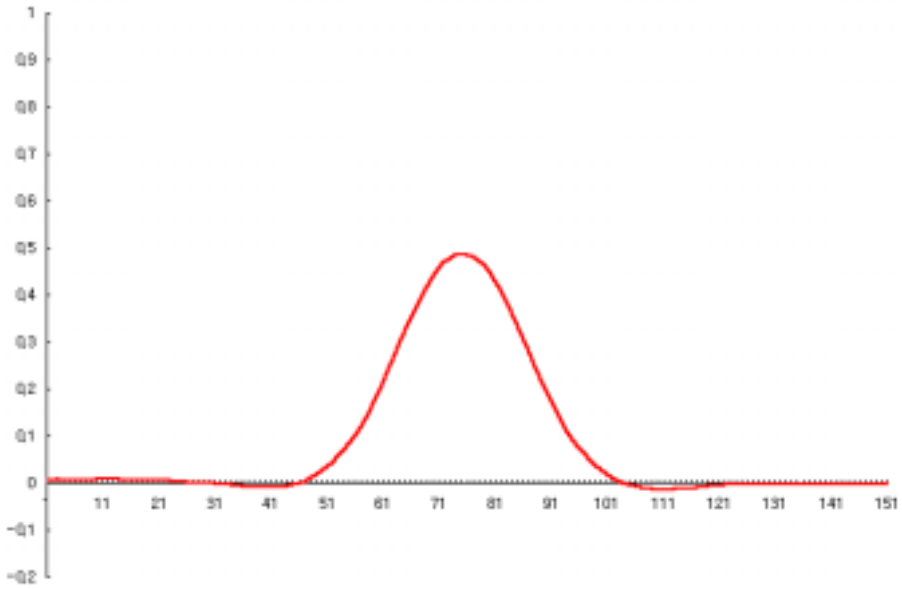


Fig. 3 Influence function of the deformable mirror

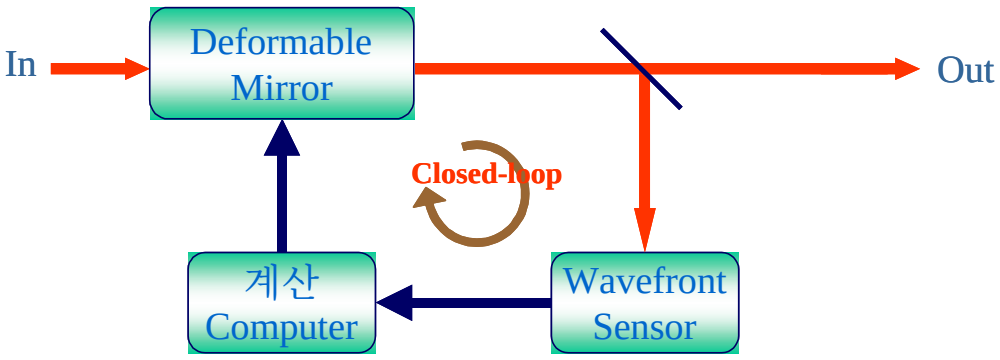


Fig. 4 Closed-loop wavefront correction algorithm

3. 파면제어 실험 및 결과

그림 4는 폐회로 파면보정[6]의 개념도이다. 파면보정 장치인 변형거울에서 나가는 레이저빔은 파면측정 장치에서 왜곡 정도가 측정되고 그 왜곡정도는 제어 컴퓨터로 보내진다. 제어 컴퓨터에서는 파면을 보정하기 위한 변형거울의 각 37 채널에서의 전압을 결정하고 변형거울 드라이버로 신호를 보낸다. 이 신호에 따라 변형거울은 변형을 하게되고 다음에 입사되는 레이저빔의 파면을 보정한다[7]. 이러한 과정은 폐회로를 이루어 계속적으로 이루어지는데, 개발된 장치의 보정 속도는 파면을 재구성하지 않고 기울기 정보로 직접 보정할 때는 5Hz이고 파면을 재구성하면서 보정 할 경우에는 1 Hz 이다.

폐회로 파면보정 실험은 먼저 변형되지 않은 파면을 파면측정센서를 사용하여 측정하고, 측정된 임의의 왜곡된 파면을 폐회로에 연결된 변형거울을 통해 보정하는 방식으로 수행하였다. 파면 측정센서의 CCD 카메라로부터 전송된 영상을 컴퓨터로 분석한 결과 픽셀의 1/15까지 점 영상의 변위를 측정할 수 있었다.

그림 5는 폐회로 파면보정을 계속할 때의 왜곡된 파면의 보정 정도를 그린 것으로, 보정전 파면의 P-V(peak to valley)치는 5.8λ 인데 비해, 보정 후는 0.6λ로 약 10배 정도 파면이 보정되는 결과를 얻었다. 보정 정도는 4회 정도의 보정이면 왜곡이 거의 보정되었으며, 이후에는 거의 비슷한 값을 유지함을 알 수 있다. 그림 6은 초기의 기준 파면과 왜곡된 파면이 폐회로 계속적으로 보정되어 가는 것을 그래픽으로 나타낸 것이다.

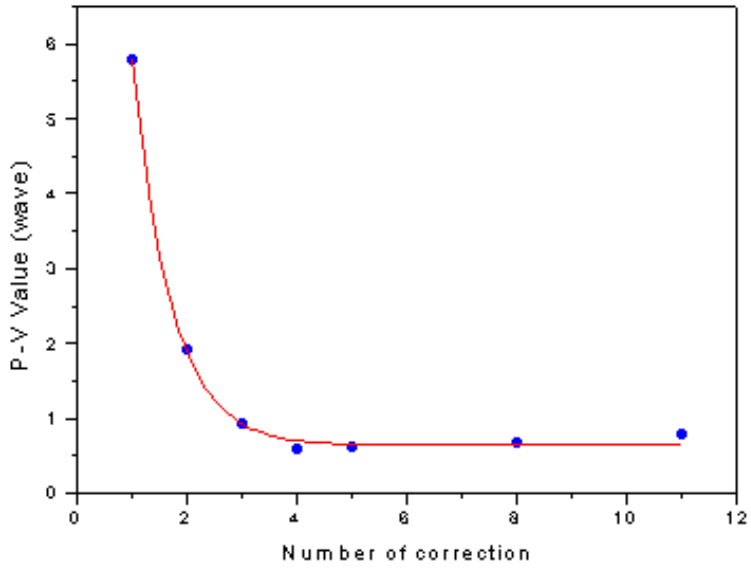
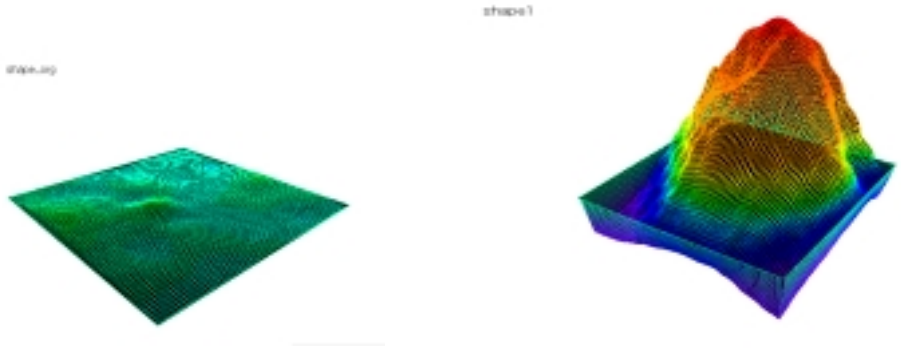
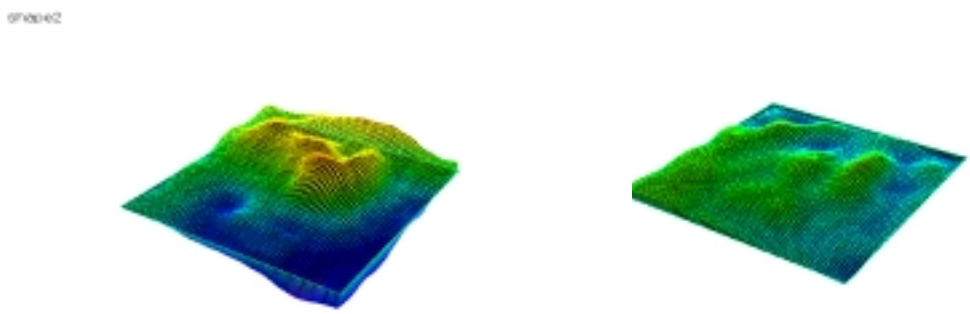


Fig. 5 Wavefront correction by closed-loop control



(a) Reference wavefront (b) Distorted wavefront



(c) Corrected wavefront after 2-loop (d) Corrected wavefront after 4-loop

Fig. 6. Experimental results of wavefront correction

4. 결 론

분광 레이저 원격전송 효율을 높이기 위한 파면보정 적응광학계를 개발하고, 실험적으로 성능을 확인하였다. 적응광학계의 핵심 장치인 Shack-Hartmann 파면센서와 변형거울을 제작하였고, 폐회로 파면보정 알고리즘을 개발하였다.

개발된 장치를 사용하여 파면보정 실험을 수행한 결과 기울기를 이용한 파면 보정 속도는 파면의 기울기를 직접 이용하여 변형거울을 구동하는 방식의 경우 약 5Hz이며, 기울기 정보로부터 파면정보를 구성하여 보정하는 경우는 1Hz까지 측정이 가능하였다. 파면보정 정밀도는 5.8 파장의 왜곡된 파면을 0.6 파장으로 보정하여 약 10 배 정도의 파면

향상 결과를 얻었다. 현재 변형거울의 초기 상태 개선과 파면측정센서의 정밀도와 보정 속도를 향상시킬 수 있도록 파면 재현 알고리즘의 최적화 연구를 수행 중이다

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, Academic Press, New York(1998).
2. J. W. Hardy, "Active optics: a new technology for the control of light", Proc. IEEE Vol.66(6), 651-697 (1978)
3. M. D. Oliker, "Alignment techniques for DM, Lenslet, and WFS camera at the SOR," Proc. SPIE 3126, 595(1997)
4. R, H. Hudgin, "Wave-front reconstruction for compensated imaging," J. Opt. Soc. Am. 67, 375(1977).
5. D. L. Fried, "Least-square fitting a wave-front distortion estimate to an array of phase-difference measurements," J. Opt. Soc. Am. 67, 370(1977).
6. G. A. Tyler, "Optimizing the performance of closed-loop adaptive-optics control systems on the basis of experimentally measured performance data," J. Opt. Soc. Am. A 14(8), 1975(1997).
7. B. R. Hunt, "Matrix formulation of the reconstruction of phase values from phase differences," J. Opt. Soc. Am. 69, 3(1979).