

샷-하트만 센서의 측정범위 확장 방법

Dynamic Range Expansion Method of The Shack-Hartmann Sensor

김지은^{*,**}, 양호순^{**}, 이윤우^{**}, 전민용^{*}
^{*}충남대학교 물리학과, ^{**}한국표준과학연구원
 emm525@cnu.ac.kr

샷-하트만 파면센서(Shack-Hartmann wavefront sensor)는 광학부품의 표면 형상 측정을 위하여 널리 사용된다. 측정파면이 렌즈배열에 입사하면 각각의 렌즈에 의해 초점이 맺히게 되고 초점 평면의 영상은 검출면에 점들의 배열형태로 나타나게 된다. 이때 검출면에 맺힌 점들 각각의 중심점을 구하고 기준파면으로부터 구해진 중심점과의 차이를 통해 국소적인 파면의 기울기를 알아내서 입사된 전체 파면을 복원하게 된다. 하지만 한 개의 렌즈배열을 통과한 점영상은 해당 하부개구(해당되는 검출기 영역)내에서의 위치변화만을 측정한다. 그 결과 측정 렌즈의 형상이 복잡하여 하부개구를 벗어나 초점이 맺혀질 경우에는 파면의 기울기를 계산할 수 없을 뿐 아니라 이 초점이 어느 렌즈배열을 통과하여 왔는지 파악하기가 어려워 결국 파면 수차를 제대로 복원하기 어려워진다. 본 논문에서는 이 한계를 극복하고 측정 영역을 넓히기 위하여 새로운 측정범위 확장 방법으로 파면복원 알고리즘을 구현하였다. 측정범위를 확장하기 위한 해결방안은 다음과 같다. 기존의 샷-하트만 센서는 기준파면이 평면파로 측정 파면과의 중심점 차이를 파면으로 복원하는 방식이었다면, 본 연구에서는 그림 1과 같이 기준파면을 CGH(Computer Generated Hologram)로부터 만들어진 이상적인 파면으로 두고 측정렌즈로부터 만들어진 실제 파면과의 중심점 차이를 비교해 파면을 복원하는 방식이다. 이때 실제 파면과 기준 파면의 중심점 차이를 통해 얻는 것은 부품의 형상오차이다.

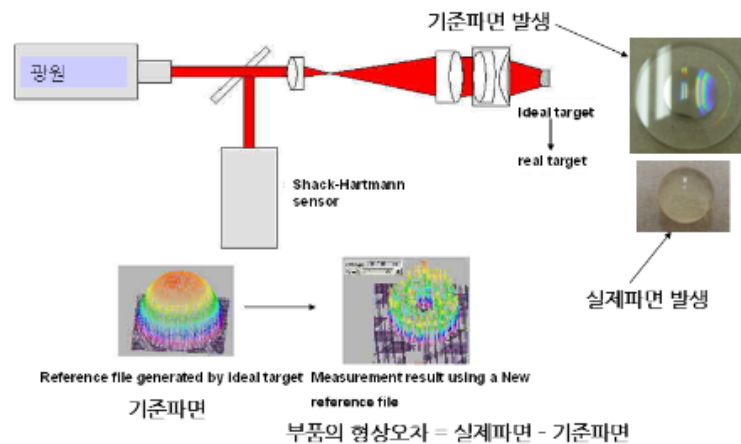


그림 1. 측정범위 확장 방법

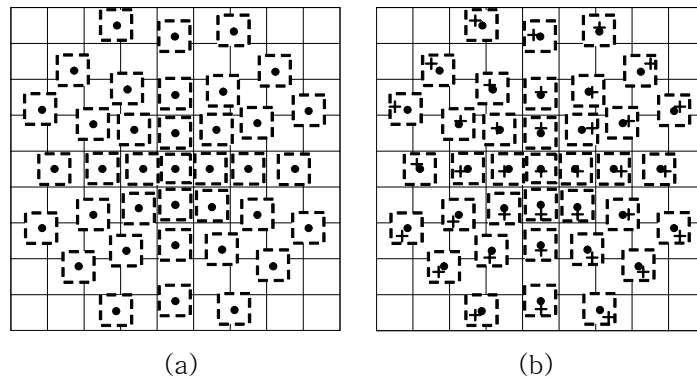


그림 2. 하부개구 설정 (a) 수차가 큰 이상적인 파면으로부터 얻은 영상점으로 기준점 정의 (b) 기준점과 실제 파면으로부터 얻은 영상점 비교

전산모사를 위해 그림 2의 (a)와 같이 수차가 큰 이상적인 파면으로부터 만들어진 영상 점들로 기준점을 정의하고 그 점들을 중심으로 하부개구를 설정한다. 정밀하게 제작된 광학 부품의 경우 실제 파면이 이상적인 파면과 수 μm 이내로 가까운 파면이면 그림 2의 (b)와 같이 기준점과 가까이에서 측정 중심점들이 형성되므로 파면 복원이 가능하게 된다. 이때 렌즈 설계 프로그램을 이용하여 렌즈배열의 위치를 유추하고 파면 수차를 복원할 수 있다.

이러한 개념의 타당성을 평가하기 위하여 실제 삭-하트만 센서의 구성품과 동일한 구조의 스펙을 사용해 전산모사 과정을 거쳤다. 전산모의실험에 사용한 렌즈배열은 41×41 의 배열을 가지며, 초점거리가 4.6 mm이고 직경이 각각 0.108 mm이었다. 입사파장은 550 nm로 하였다. 측정할 모의렌즈는 곡률반경이 100 mm인 양볼록렌즈로 두께는 5 mm이고 재질은 BK7이다. 중심점 측정 알고리즘은 무게 중심법을 이용하였고 파면복원은 Southwell 방법을 이용하였다. 측정 가능한 최대 위상오차는 $25.6 \mu\text{m}$ 이다. 파면복원 결과 RMS가 $0.03739 \mu\text{m}$ 로 이론값과 수 nm의 오차를 보여 정밀하게 복원 가능함을 확인하였다. 또한 P-V가 $76 \mu\text{m}$ 의 큰 파면수차가 생기도록 하여 일반적인 삭-하트만 센서의 측정범위를 벗어나도록 하였을 때 RMS가 $21.9619 \mu\text{m}$ 로 이전과 마찬가지로 정밀한 파면복원이 가능하였다. 마지막으로 본 논문에서 제안하는 방식으로 기준 파면을 P-V가 $76 \mu\text{m}$ 인 파면으로 두고 실제 파면이 P-V가 $76 \mu\text{m}$ 인 파면이라 할 때 형상오차를 복원하였다. 그 결과 RMS에 대한 이론값은 $0.1702 \mu\text{m}$ 이고 복원한 값은 $0.1845 \mu\text{m}$ 로 큰 파면 수차에 비해 매우 정밀한 형상 오차가 측정 가능함을 확인하였다. 따라서 f-theta 렌즈와 같이 복잡한 형상을 갖는 비구면, 비대칭성 렌즈의 파면복원도 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

1. JOHN W. HARDY, "Adaptive Optics for Astronomical Telescopes", Oxford University Press, Inc. (1998).
2. Junwon Lee, "Sorting method to extend the dynamic range of the Shack-Hartmann wave-front sensor", Appl. Opt. 44, 4838-4845 (2005).