샤크-하트만 파면 감지기의 측정범위 증가에 관한 연구

A study on an increase of Dynamic Range of a Shack-Hartmann Wavefront Sensor

이 원 웅, 황보창권, 이 준 호*
인하대학교 물리학과, *한국과학기술원 인공위성 연구센터
hacja@korea.com

현재 광학부품(렌즈,미러,프리즘)들은 광학제품(카메라,프로젝터,망원경)들의 성능을 개선시키기 위하여 크기와 모양을 임의대로 설정하고 있기에 이에 따른 설계 및 제조기술이 점점 다양화 되어 가고 있다. 이로 인하여 다양한 모양과 크기를 가지는 광학부품의 정밀한 평가를 수행하는 것이 중요시 되고 있고, 이 중에서 부품의 표면 평가를 위하여 여러 방법들을 사용하고 있는데, 대표적으로 간섭계를 주로 사용하고 있다. 하지만, 이러한 광학부품을 측정함에 있어 간섭계는 CGH(Computer Generated Hologram), null lens등 추가적인 광 부품들을 제작해야하고, 본질적으로 간섭조건을 만족해야하며, 정렬의 어려움, 환경의 영향에 민감하며, 100λ이상의 큰 수차를 가지는 광학계의 측정이 어렵다는 제약이 따른다.

최근에 광학평가에 있어 각광받고 있는 또 다른 방법이 샤크-하트만 파면 감지기(Shack-Hartmann Wavefront Sensor)이다. 이 방법은 위상차에 의해서 직접적으로 파면을 측정하는 간섭계와는 다르다. 이 감지기는 측정파면이 배열렌즈(lens array)로 인하여 발생하는 기하광학적인 특성으로 파면의 기울기를 알아내고 이로부터 파면을 유추하여 측정파면을 재구성하는 간접적인 방법을 사용한다.

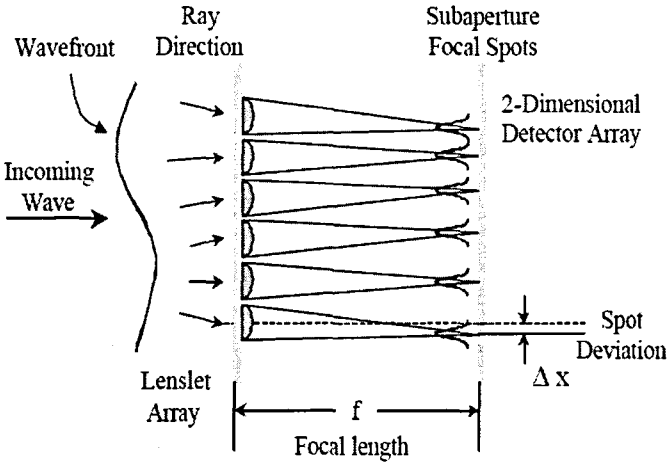

그림1. 샤크-하트만 파면 감지기의 측정 원리

그림 1을 보면 배열렌즈는 입사 파면의 독립적인 상을 형성하는데 왜곡되지 않은 평면파(기준파)가 입사한다면 배열렌즈의 초점(기준점)이 검출면에 영상점이 되지만, 수차를 가진 파면이 입사한다면 본래의 초점(기준점)에서 벗어나는 위치에 영상점(실제점)이 발생한다. 따라서, 모든 배열렌즈에 의한 기준점과 실제점 사이의 이동변위에 따른 기울기 정보로부터 전 파면을 재구성하여 파면의 정보를 얻는다. 파면의 재구성은 역 선형 문제의 결과이고, 수치적 해결법은 잘 알려져 있다.

샤크-하트만 파면 감지기는 각각의 배열렌즈에 의하여 정의된 하부개구(subaperture) 안에 본래의 영상점이 존재해야만 입사파면을 재구성 할 수 있다. 하지만, 수차가 큰 파면이 입사할 경우 영상점들은 본래의 하부개구를 벗어난 지점에 영상점이 존재하므로 정확한 이동변위를 측정할 수 없게 된다. 결국, 샤크-하트만 파면 감지기의 측정범위(dynamic range)는 배열렌즈에 의해 결정되고 이를 증가시키고자 하는 아이디어들이 발표되고 있다[1].

본 연구에서는 다른 광학부품을 사용하지 않고 배열렌즈에 의해 제한된 파면 측정범위의 한계를 보다 증가시키기 위해 우선적으로 정확한 영상점의 위치를 파악하기 위해 반복적인 중심점 추출 알고리즘을 사용하였고, 큰 수차값을 가진 파면으로 인해 본래의 하부개구를 벗어나 다른 하부개구에 존재하는 영상점을 추적하기 위해 검출면(CCD) 이동방법에 대하여 제안하였고 전산모의를 통하여 이를 증명하였다. 전산모의는 제르니케 다항식을 이용하여 양과 음의 수차가 큰 구면수차(Spherical Aberration ; SA)의 입사파면을 만들고 배열렌즈에 의한 각각의 영상점에 대하여 강보 분포에 따라 반복적으로 중심점을 발견하는 알고리즘을 적용하여 모든 영상점의 중심점을 발견하고 본래의 하부개구를 벗어나는 중심점에 대하여 검출면의 이동(defocus)을 통하여 이동 벡터를 구하고 기하광학 이론에 의하여 본래의 기준점과의 변위를 알아냄으로서 정확한 위치를 찾도록 하였다.

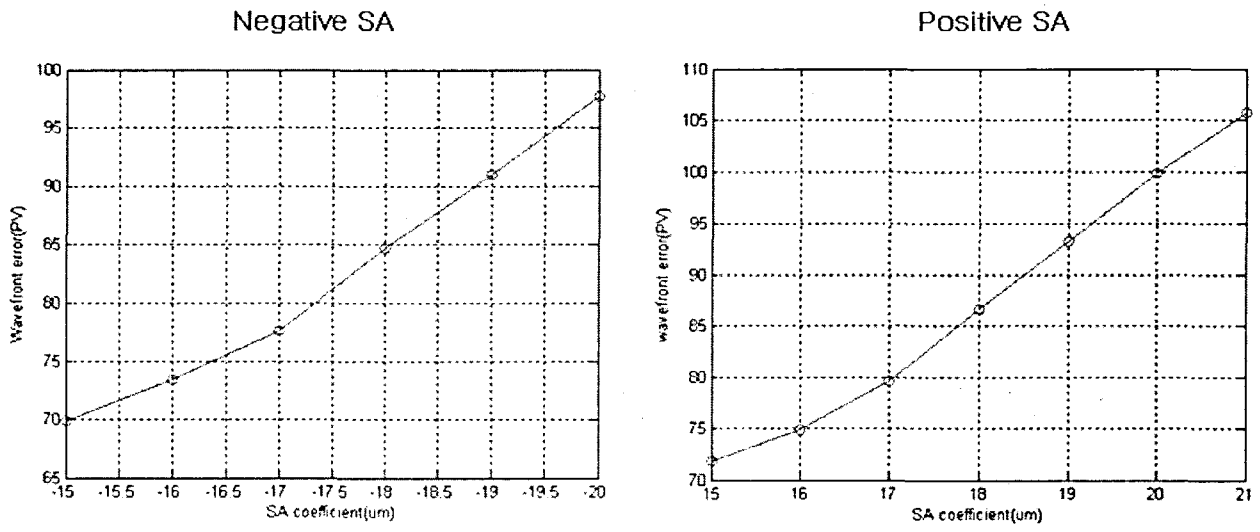

그림 2. 구면수차 계수에 따른 전산모의 결과

결과적으로, 전산모의에 사용된 배열렌즈로 인해 제한된 측정범위는 75λ에 불과했지만, 그림 2에서 보는 바와 같이 반복적인 중심점 발견 알고리즘과 검출면 이동에 따른 정확한 위치 추적으로 P-V값이 105λ인 구면 수차 파면을 측정할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. N. Lindlein, J. Pfund and J. Schwider, "Algorithm for expanding the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using a spatial light modulator array," *Opt. Eng.*, **40**(5), 837-840, (2000).

FF