

# 인체안(眼)의 광학수차 측정을 위한 Shack-Hartmann

## 파면분석기 연구

### Studies on Shack-Hartmann wavefront analyzer for measuring the optical aberration of human eye

고동섭\*, 이경섭\*\*, 유용성\*\*, 권혁제\*\*\*, 김현수\*\*\*

\*목원대학교 광 및 전자물리학과 및 의료광기술연구소, \*\*ALC 안과(서울), \*\*\*미래광학(주)

dsko@mokwon.ac.kr

눈의 시력을 진단하는 도구 또는 장비로는 자각식 측정법인 시력표, 타각식 계측기로는 검영기와 자동굴절력측정기 등이 있다. 이들 방법으로 얻는 결과는 시력 또는 굴절력 값으로 제한된다. 그러나 인체안도 일반 광학계와 같이 공간적으로 불균일한 광학적 특성을 가지기 때문에, 눈의 광학적 기능을 정확하게 진단하기 위해서는 공간에 따른 광학수차 분포를 측정할 필요가 있다. 특히 엑시머레이저를 이용한 굴절각막교정수술에서, 광학수차 정보는 정교한 교정수술을 위한 기초 자료가 될 수 있다.

광학수차 측정에 관한 방법 연구는 1619년 Scheiner로부터 시작하여 1961년 Smirnov, 1900년 Hartmann, 그리고 1971년 Shack 등이 Shack-Hartmann 파면분석기(이하 SH 파면분석기)를 완성하게 되는 오랜 역사를 가지고 있다. 1994년 Liang 등이 SH 파면분석기를 사용하여 인체안의 광학수차를 측정함으로써 임상학적으로 활용가능성을 확인하였고, 1999년 Seiler 등이 파면분석을 이용한 웨이브프론트수술법을 시행하여 많은 관심을 끌었다. 현재는 이와 관련된 임상학적 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 기술적으로도 많은 진보가 일어나고 있다.<sup>[1]</sup>

현재 대부분의 SH 파면분석기들은 굴절각막교정수술 장비와 연계하여 사용할 목적으로 개발되었으며, 그 가격도 매우 고가이므로 사용자가 극히 제한되어 있다. 이에 본 연구에서는 일반 검안용으로 사용 가능한 SH 파면분석기를 개발하는데 목적을 두고 기초연구를 진행하였다. 국내에서 SH 파면분석기와 관련된 연구는 일부 연구기관에서 수행 중에 있으나, 인체안을 대상으로 하는 연구는 극히 초보단계에 있기 때문에 기초적인 검증 연구부터 시작하게 되었다.

SH 파면분석기에는 파면을 수많은 작은 부분으로 나누어 관찰하기 위해서 미소렌즈(micro-lens)를 배열시킨 장치가 장착되어 있다. 이 미소렌즈배열을 렌즈릿 배열(lenslit array)이라고도 한다. 각 미소렌즈로 입사하는 광선의 방향에 따라서 CCD에 집속되는 위치가 달라지게 된다. 파면이 왜곡되어 있지 않다면 CCD 상에서 상점(image point)들은 정방형으로 배열하게 된다. 만약 상점들이 횡방향으로 편이된다면 그 편이된 양은 각 미소렌즈 위치에서의 파면의 기울기, 즉 파면수차함수에 대한 정보를 제공한다. 이 기울기를 모으면 왜곡된 파면의 모양을 그려낼 수 있다.

레이저광을 망막에 집속시키면, 반사된 광이 각막 방향으로 진행하는데, 만약 안구에 광학적으로 불균일한 부분이 있다면 파면이 부분적으로 왜곡된다. 광학적으로 균일하다고 하더라도 근시 또는 원시와 같은 굴절이상이가 있다면, 각막 표면에 도달한 광파는 수렴하거나 발산하는 파면을 갖게 된다. 이 파면을 SH 파면분석기로 측정하므로써, 위치에 따른 파면수차를 산출하게 된다.

본 실험에서는 렌즈간 간격이 약 0.4 mm, 초점거리가 40 mm인 미소렌즈배열판을 사용하였다. 만약

각막표면을 1:1 크기로 미소렌즈 표면에 투영시킨다면, 직경이 6 mm인 동공인 경우 약 180 지점의 파면 정보를 얻을 수 있다. CCD 카메라 이미지는 컴퓨터에 저장하여 분석하게 된다. 이때 파면수차함수는 Zernike 다항식의 선형결합으로 표현할 수 있으며, 각 다항식의 계수를 구하면, 눈의 굴절력 도수외에도 여러 종류의 파면수차가 발생한 정도를 알아낼 수 있다. 이 과정에서 최소제곱법에 근거한 곡선맞춤 알고리즘을 직접 작성하여 이용하였다.

일반적으로 레이저광, 안구의 움직임, CCD 카메라, 이미지 수집장치 등이 광점 이미지의 광세기 분포에 영향을 미치며, 결국 광점 중심점 계산에 오차를 유발하게 된다. 따라서 광점 중심점의 불규칙한 편차가 수차계수 계산 결과에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다. 본 실험에서는 컴퓨터 프로그램으로 random noise를 발생시키고 이것을 광점 데이터에 더하여 수차계수와 파면수차함수를 산출하였다. 이 계산 결과를 원래의 데이터와 비교하므로써 random noise가 측정결과에 미치는 영향을 평가하여 보았다.

그림 1은 구면과를 측정하고 위와같은 방법으로 random noise를 더하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 중심점 편차가 ± 1 픽셀인 경우, 약 ±0.015 디옵터 이내에서 정확하게 계산이 되었으며, 최대 ±0.5 픽셀의 편차가 있더라도 ±0.005 디옵터 이내에서 정확한 계산 결과를 얻을 수 있었다. 본 계측기의 최종 계측오차는 ±0.1 디옵터에 목적을 두고 있기 때문에, 만약 계측기에서 발생하는 잡음들이 random하다면, 이들 잡음이 계측 결과에 미치는 영향은 무시할 수 있을 것으로 평가하였다.

그 밖에 광점의 중심점 편차 특성과 광점수에 따른 계산오차 등 SH 파면분석기가 가지고 있는 특성 및 계산 과정에의 문제점들을 정리하였다. 마지막으로 상품화된 파면분석기를 사용하여 실제 인체안을 측정한 결과를 보여주고자 한다. 이 데이터에는 라식 수술 전과 후, 그리고 일정한 시간이 경과한 후의 파면수차 변화를 비교한 내용도 포함되어 있다.

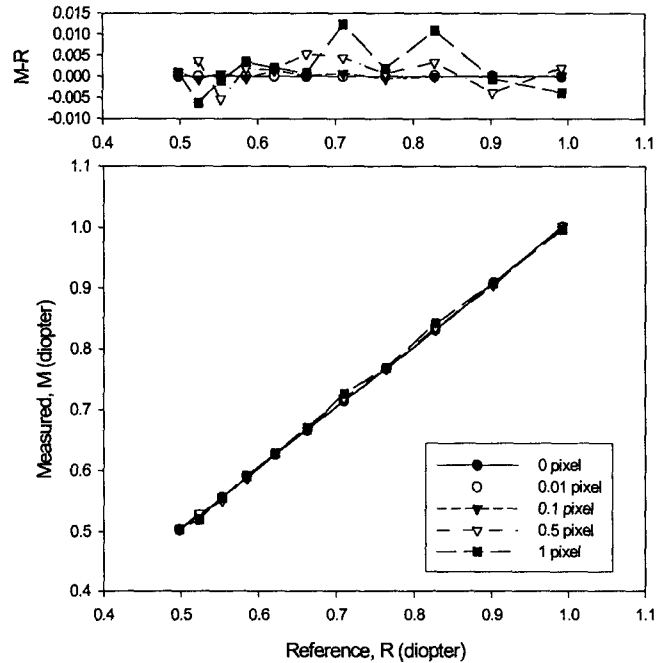


그림 1. 잡음이 측정 결과에 미치는 영향.

M  
F

1. B. F. Boyd, "LASIK and beyond LASIK : Wavefront analysis and customized ablation", 1st ed. (Highlight of Ophthalmology, El Dorado, 2001).