

AQuaKET 개괄 - 초대구경 나노정밀도 광학측정법

AQuaKET Overview - A Nano-Accuracy Testing Method for Very Large Optics

김 영수

한국 항공 우주 연구원

ykim@kari.re.kr, Tel.042-860-2522

밀레니움을 전후하여 세계적으로 8m급 초대형 망원경들이 만들어지고 있다. ESO (European Southern Observatory)의 VLT (Very Large Telescopes) 4기, 미국 영국 캐나다 등의 연합 Gemini telescope 2기, 일본의 Subaru 1기 등, 10여기의 망원경들이 완성되었고, 차세대 망원경들이 50m급으로 디자인되고 있다. 우주망원경도 지름 2.4m인 허블 우주망원경(Hubble Space Telescope)의 뒤를 이어 6m급의 차세대 우주망원경 (Next Generation Space Telescope)이 개발되고 있어서 2010년경에 발사될 예정이다. 이러한 초대형 광학은 갈수록 더 높은 정밀도를, 심지어는 회절한계까지, 요구하게 됨에 따라 측정법도 더욱 정밀한 방법을 필요로 하게된다. 게다가, 대형 망원경의 광학부는 Ritchey-Chretien 방식을 많이 사용하므로, 비구면도가 큰 mirror들을 시험할 수 있는 방법이 요구되고 있다. 현재 통용되는 시험 방법들은 영점 렌즈(null lens)와 같은 보정 광학계를 추가로 필요로 한다. 그러나 추가된 광학계에 의한 결함으로 인하여 잘못된 측정결과를 가져올 위험이 있다. 그 실 예로, 허블 우주망원경의 주경(primary mirror)은 영점 보상계 자체가 잘못 만들어짐으로써 잘못된 측정결과를 얻었고, 결국 원하는 형상대로 가공하는 데 실패했다. 이것은 허블 망원경을 1990년에 우주에 띄운 후 영상을 받아본 다음에서야 알게 되었고, 그 잘못된 형상을 보정하는 COSTAR (Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement)라는 보정계를 만들어서 3년 후인 1993년에 우주공간에서 수리를 했다. 이로 인하여 귀중한 시간을 허비하고 막대한 금액이 추가로 투입된 것이다. 이러한 중대한 실수를 피하기 위해서는, 적어도 두 가지의 전혀 다른 측정법을 사용하여 상호 검증하는 방안이 요구된다.

이와 같은 관점에서 본 연구자는 새로운 측정법을 개발하였는데, “자동화된 정량적 칼날 주사 측정법 (Automated Quantitative Knife-Edge Test, AQuaKET)”이다. 이것은 기하학적인 방법으로서, 가장 오래된 측정방법 중 하나인 푸코 측정법(Foucault test)을 새로운 개념으로 변환시킨 것이다. 이 AQuaKET은 일반적으로 많이 사용하는 방법들인, interferometer를 이용하여 측정하는 방법과는 전혀 다른 방법인 것이다. 푸코 측정법의 장점은 측정 시에 부수적인 광학계가 필요하지 않아서 이로 인한 측정오차를 유발하지 않는다는 것이다. 반면에 단점이 있는데, 측정결과를 정량적으로 알 수 없다는 점이 그러하다. 따라서 정량적인 칼날 주사법은 이러한 푸코 측정법의 장점을 살리면서 동시에 단점을 소거, 측정결과를 수치적으로 얻을 수 있는 새로운 개념들을 도입한 것이다.

초대구경 망원경들이 요구하는 image quality로부터 mirror의 시험 정밀도를 파악하기 위하여 8m 망원경인 Gemini telescope를 case study 하였다. Image size를 0.1arcsec까지 낮추는데 요구되는 정밀도를 산정한 결과 rms 0.01λ ($\sim 5\text{nm}$), peak-to-valley 0.05λ ($\sim 25\text{nm}$)였다. 이러한 nanometer 수준의 정밀도를 구현하기 위해서 AQuaKET은 새로운 개념들을 도입하였다. 우선, 푸코 측정법은 초점에 칼날을 댄을 때에 생기는 이미지의 모양으로부터 광학계의 표면 굴곡을 판단한다. 반면에, AQuaKET은 칼날을 초점이 아닌, 초점의 앞과 뒤에서 단계적으로 이동하면서 이미지의 형태 변화를 기록한다. 또한,

Intensity Subtraction, Peak Finding, Area Difference method, Local Focus Sensing과 같은 알고리즘을 직접 개발하고, Refined simplex method, Weighted trapezoid rule 등을 포함하는 여러 가지의 data processing 기법을 개선하여 측정법의 정밀도를 높였다. 또한, 정밀한 측정을 위하여 Parallax 등의 광학적 오차뿐만 아니라, alignment, Blade angle, 위치정밀도에 의한 기계적인 오차, 그리고 binning & matching 등의 image processing 오차를 최소화하는 방법들을 개발하였다. 완성된 AQuaKET을 이용하여 세 개의 mirror를 측정하였는데, 비구면까지도 포함하여 요구하는 정밀도로 측정 가능성이 입증되었다. 또한, 대구경의 측정에서는 주위 환경의 영향이 매우 크다는 것도 밝혔다. 한편, Eastman Kodak에서도 푸코 측정법을 응용하여 정량적 결과를 얻었는데, Kodak의 방법과 시험결과에 대해서 비교 분석한 결과, Kodak의 방법은 몇 가지 문제점을 가지고 있었다.

이 논문에서는 고 정밀도 측정법을 개발해야 할 필요성, 자동화된 정량적 칼날 주사 측정법의 원리와 정밀도 산정, 그리고 이 방법을 이용하여 반사경들을 측정한 결과에 대하여 발표한다.

주요 단어: 광학계 측정법, 대구경, 비구면, 나노 정밀도, 푸코 측정법, 칼날주사법, 회절, Parallax, Simplex, 측정학

Key words: Optical testing, Large optics, Asphericity, Nano accuracy, Foucault, Knife-edge, Diffraction, Parallax, Simplex, Metrology

