

NIST에서 개발 중인 자유곡면 측정을 위한 곡률간섭계 The Geometry Measuring Machine(GEMM) project at NIST

김병창

경남대학교 기계자동화공학부

bckim@kyungnam.ac.kr

현대 산업기술 발전의 3대 모멘텀인 소형화, 저가격화, 고기능화는 광학 관련 제품에 있어 비구면을 출현시켰다. 등장한 비구면은 여러 개의 기존 구면을 대체하면서 광학시스템을 혁신적으로 바꾸어 놓았을 뿐만 아니라 제조 및 측정 기술을 보유한 국가나 기관에게 경제적인 효과와 함께 우주 관련 기술선점의 효과를 안겨 주었다.

다시 향후 10년 안에 새로운 도전이 예고되고 있다. 자유곡면의 등장은 산업기술 발전의 3대 요소를 더욱 심화 시킬 뿐만 아니라 전혀 새로운 제품과 응용분야를 잉태할 것으로 예상되는데, 이는 인체의 대체기관의 형태로 또는 인공위성을 경량화 시키는 핵심적인 기술요소 등으로 현재 대두되고 있다.

현재 비구면 형상의 제조와 측정에도 많은 어려움이 여전히 남아 있는 상황에서 자유곡면 형상을 측정하기 위한 시도들은 국내외적으로도 활발하지 못한 상황이지만, 미래의 시장성을 대비하기 위해 국가적인 차원에서 독일표준연구소(PTB)와 미국표준연구소(NIST) 등에서 이에 대한 연구를 시작하고 있다. 1999년 PTB는 비구면 및 자유곡면 형상 측정을 위해 보정광학계(Null optics)와 같은 특별한 장치가 없는 방법으로써 곡률 측정법을 이용하여 LACS(Large Area Curvature Sensor)를 제작하였으며¹, NIST는 2003년 이후로 동일한 곡률 측정법을 이용해 자유곡면 형상 측정을 위한 GEMM 프로젝트를 수행하고 있다. 측정물의 형상에 있어서 곡률이란 형상의 2차미분값과 밀접한 관계를 가지고 있는 물리량으로써 측정장비의 이동 및 자세오차와 독립적인 형상 고유의 성질(intrinsic parameter)이다. 이러한 기하학적 개념은 1990년 Glenn에 의해 처음으로 형상측정에 시도되었으며², 기존의 측정법으로는 접근하기에 까다로운 자유곡면 측정에 응용되어 시도되고 있다.

1차원적 높이형상 $z(y)$ 와 곡률 $k(y)$ 의 관계는 수식1과 같은 비선형 미분방정식으로 표현된다³. 여기에서 y 는 1차원적 위치를 나타낸다.

$$\frac{d^2z(y)}{dy^2} = k(y) \left(1 + \left(\frac{dz(y)}{dy} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

수식1은 공간에서 임의의 곡선을 표현하는 Frenet's 식으로 각 점의 곡률값이 획득되면 적분을 통해서 전체 형상이 복원될 수 있음을 표현한다. 임의의 지점 y 에서의 곡률 $k(y)$ 를 결정하기 위해서는 국부영역의 3차원 형상을 측정하여 측정 영역의 중심점에 해당되는 지점의 곡률을 추출하는데, 이를

위해 FISBA사의 트와이만-그린 간섭계를 사용하였으며, 국부영역을 측정하기 위해서 사용된 상용 간섭계는 그림1과 같이 6축 운동이 가능한 PI사의 Hexapot 끝단부에 장착을 되어 측정 대상물을 스캔하며 측정한다.

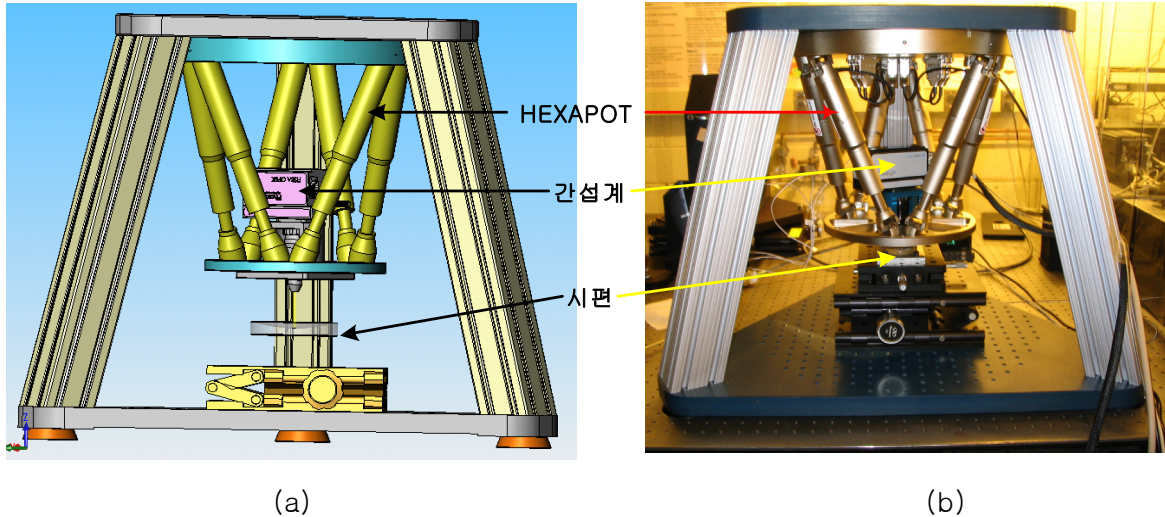


그림1. 곡률형상 측정기 구성도. (a) 시스템 구성도, (b) 실제 시스템 사진

NIST에서 제작되어져 GEMM프로젝트를 수행하고 있는 장비는 그림1과 같이 3개의 축대칭 구조를 이루며, 윗판에 Hexapod이 거꾸로 장착되어 있으며, Hexapod의 하단부에 상용간섭계가 부착되어져 구간구간 이동하며 국부영역의 곡률을 획득한다. 사용된 Hexapod은 공간상의 임의점을 피봇점으로 회전할 수 있는 기능이 있어 측정영역의 변화없이 광축을 조정할 수 있다.

곡률형상 측정법은 측정시스템의 이동부의 위치오차에 둔감한 특징을 가지고 있다. 간섭계를 이동시키는 이동부의 위치오차가 $\pm 5\mu\text{m}$ 반복능을 보일 때 형상복원 오차는 50mm 측정구간에서 $7 \times 10^{-2}\text{nm}$ 의 형상오차를 보이는 것으로 해석된다.

직경 50mm를 가진 구면 거울을 측정하였을 때, 구면 거울의 설계값과 최대 37nm 오차를 가지고 형상이 복원되었으며, 온도에 민감한 결과를 보였다.

1. C.Elster, J.Gerhardt, P.Thomsen-Schmidt, M.Schulz, and I.Weingartner, "Reconstructing surface profiles from curvature measurements," Optik 113, pp.154, 2002.
2. P.E. Glenn, "Angstromlevel profilometry for submillimeter to meter scale surface errors," Advanced Optical Manufacturing and Testing, Proc. SPIE 1333, pp.326 (1990).
3. M.P.do Carmo, Differential Geometry of Curves and Surfaces, Prentice Hall, (1976)