

## PMP 형상 측정법에서 비선형 오차보정에 관한 연구

황용선\*(전북대 대학원), 강영준(전북대 기계공학부, 메카트로닉스 연구센터)  
박낙규(전북대 대학원), 백성훈(한국원자력연구소)

### A study on the nonlinear error correction of the phase measuring profilometry

Y. S. Hwang (Mech. Design Dept., CBNU), Y. J. Kang (Mech. Eng. Dept., CBNU), N. K. Park  
(Mech. Design Dept., CBNU), S. H. Baik (KAERI)

#### ABSTRACT

Phase Measuring Profilometry(PMP) has been developed as one of three dimensional 3-D shape measuring methods. The 3-D profile of an object was calculated from the phase data obtained by the sinusoidal patterns projected on the object. However, in some cases the approximation includes considerable errors. In this paper, the effect on the errors caused by the optical geometry and the calibration procedure in PMP technique are discussed. The errors which occurred in the process of calculating the 3-D profile from the phase distribution are investigated theoretically and experimentally.

**Key Words** : PMP( Phase measuring profilometry ), phase distribution (위상 분포) 3-D profile(3차원 프로파일)

#### 1. 서론

최근 기계가공 부품의 삼차원 표면 형상 측정 기술의 필요성이 날로 증대되어 금형 가공의 CAD/CAM 기술이나 가공 금형의 삼차원 형상 치수 정밀도의 측정, 양산되는 기계류 부품의 품질 관리 등에 쓰이고 있다. 3차원 형상 측정기술의 발전방향은 고 정밀화, 고속화 그리고 비접촉화 되고 있다. 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 3차원 형상측정기술로는 과거에는 접촉식 3차원좌표측정기를 이용한 접촉방법이 있었으나, 최근에는 광학 이론을 바탕으로 하여 편리성과 측정대상에 손상을 입히지 않는 등 많은 장점들로 인하여 비접촉 3차원 측정법에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 광학식 비접촉 3차원 측정법에 대한 연구로써 간섭무늬 패턴을 물체에 투영하여, 생성된 간섭무늬의 변형정보에 위상이동법을 적용하여 3차원 물체의 위상정보를 획득하는 위상측정 3-D 형상 측정법에 대한 것이다. 투영된 패턴을 CCD로 기록하고, 기록된 정보를 컴퓨터에 입력한 뒤 소프트웨어를 이용하여 높이 정보를 추출하여 형상을 재구성하였다.

시스템의 주요 요소인 광학 투영기와 CCD를 이용한 이미지 기록장치의 기하학적 요인에 의한 영향

을 무시할 수 없다. 본 실험에서 사용한 측정 시스템의 중요 요소인 투영계와 기록계에 의해서 발생하는 비선형 오차를 확인하였다. 이 측정된 값을 광학구성상 같은 조건을 준 상태에서 AUTOCAD2002를 통해 얻은 위상차와 기하학적 관계식을 통해 얻은 pitch변화값을 구해서 보정하는 방법을 제시하였다.

#### 2. 원리

##### 2.1 광학계 원리

광학계의 구성은 패턴을 생성하고 투영하는 투영계와 패턴을 기록하는 기록계로 구성된다. 편위상 기록계를 측정 평면에 수직으로 위치시키고, 반드시 요구되는 조건은 아니지만 L로 표시되는 높이가 투영·기록계 간고, 투영계와 기록계의 거리 d에 같게 한다. 이 조건을 이용하여 결과를 해석하는 수식은 보다 간단히 할 수 있다.

Fig. 1은 기본적인 형상측정 광학계의 구성을 보여주고 있다. 프로젝터 부분에 패턴 투영 광학계를 설치하고, CCD에서 이미지를 획득, 기록하여 컴퓨터로 처리하게 된다. 프로젝터 부분에서 sinusoidal 각자 패턴을 생성하고 투영하게 되는데, 레이저 간섭계를 구성하여 투영하거나, 컴퓨터 프로그램을 통해

격자 패턴을 생성해서 투영할 수 있다.

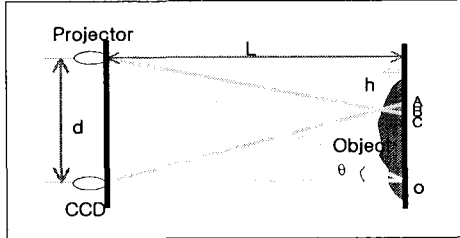


Fig. 1 Optical geometry of the PMP system

기준면 위에 투영된 간섭격자 무늬의 밝기 정보는 다음 식으로 표현된다.

$$I_R = a(x, y) + b(x, y) \cos \phi(x) \quad (1)$$

$a$ 는 화상의 배경 밝기를 나타내고,  $b$ 는 간섭무늬의 명암대비를 나타낸다.  $\phi$ 는 각 지점에 존재하는 고유한 위상으로써, 기준면에서의 각 점은 어느 기준점에 대하여 다음과 같은 고유한 위상값을 가진다.

$$\phi_c = 2\pi n + \phi_c' \quad (2)$$

$n$ 은 순차적으로 정해지는 정수이며,  $\phi_c'$ 는 0에서  $2\pi$  사이의 값을 가진다.

투영계에 의하여 삼각함수형 밝기 정보를 가지는 sinusoidal 격자패턴을 투영하고, 격자패턴의 pitch의 1/4에 해당하는 만큼 이동하여 상대적인 위상차 (각  $\pi/2$ )를 지니는 4개의 화상을 생성하게 된다. 즉 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$ 가 되도록 순차적으로 이동시켜 각각의 위상이동에 대한 화상( $I_1, I_2, I_3, I_4$ )을 구할 수 있다. 위상이동량을 화상처리 장비에 입력한 후 이를 물체의 각 지점에서의 위상값을 구하면  $2\pi$ 마다 불연속성을 지니게 되는 위상도(phase-map)를 얻을 수 있다. 각각의 위치에서의 재생강도는 다음 식과 같이 나타낸다.

$$I_1 = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (3)$$

$$I_2 = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}] \quad (4)$$

$$I_3 = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \quad (5)$$

$$I_4 = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}] \quad (6)$$

측정물체 표면의 각 점들의 위상값을 얻기 위해 윗식에서 위상( $\phi$ )에 대해 정리하면 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (7)$$

높이 산출에 대한 관계식은 기하학적 관계에서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$h(x, y) = \frac{AC \cdot L}{d + AC} \quad (8)$$

여기서  $AC$ 는 기준면과 물체면의 위상차로 획득한 위상값으로 나타낼 수 있다.

$$AC = p_o \frac{\Delta\phi(x, y)}{2\pi} \quad (9)$$

$p_o$  : 투영간섭무늬 격자의 pitch

$\Delta\phi$  : 기준면과 물체면의 위상차

기준면과 물체면 위상차에 의한 물체의 측정 위상값이 선분  $AC$ 와 대응하기에는 여러 가지 오차 요인이 존재할 수 있으나, 기본적으로 위와 같은 위상값으로 물체의 각 점에서의 높이정보를 구할 수 있게 된다.

$$h(x, y) = \frac{p_o \Delta\phi L}{2\pi d + p_o \Delta\phi} \quad (10)$$

## 2.2 측정 보정

PMP 측정법은 투영계와 기록계의 기하학적 구성과 광학적인 문제에 의해서 기본적인 보정오차를 가지고 측정하게 된다.

일반적으로 광학PMP 형상 측정의 경우에 측정면과 광학계의 높이가 피측정면에 비해서 상당히 큰 경우, 몇 가지 측정 요인에 대해서 가정하게 되는 문제에 대해서 보정을 실시하고자 한다.

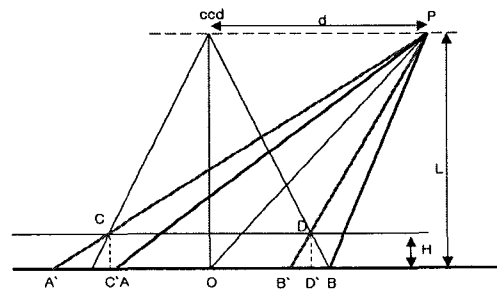


Fig. 2 Optical geometry

먼저, Fig.2에서 보이는 것처럼 CCD와 프로젝터에 의해서 발생하는 문제로, CCD에서 높이 방향으로 측정 영역이 작아지게 됨으로써 측정 파장이 기준면에서의 위치와 높이 방향에 따라서 다르게 나타난다. 또한 프로젝터가 측정면에서 수직으로 투영하지 않으므로 기준면에서 A와 B지점의 측정 pitch가 다르게 적용됨을 알 수 있다. 이러한 원인으로 인해서 일정한 높이면에서의 측정을 행할 경우 오차로 인해 정확한 측정을 할 수 없게 된다. 이를 보정하기 위해서 기준면과 평행한 측정면으로 측정된 위상값과 비교하여 보정을 실시한다.

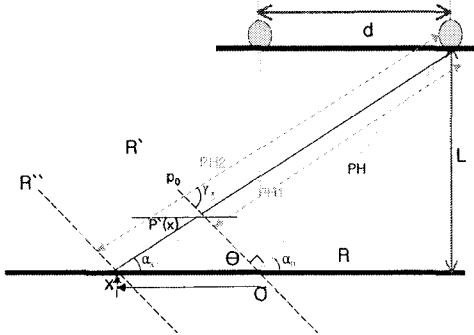


Fig. 3 The diagram for the analysis of PMP system

먼저 기본 측정식 (10) 에 pitch 와 x 방향에 측정 지점의 위상을 보정하여 측정 보정을 실행한다.

$$h(x, y) = \frac{p(x) \Delta\phi(x) L}{2\pi d + p(x) \Delta\phi(x)} \quad (11)$$

기하학적인 관계식을 이용하여 측정 시스템에서 주어지는 pitch의 변화값을 x 측정 지점에 대한 pitch 값으로 표현할 수 있다.

$$p(x) = p_0 \frac{d+x}{d} \frac{\cos \alpha_o \cos (\alpha_o - \alpha_x)}{\cos \alpha_x} \quad (12)$$

여기서,  $p(x)' = p_0 \frac{\sin \gamma_x}{\sin (\gamma_x - \theta)}$

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 실험장치 및 분석

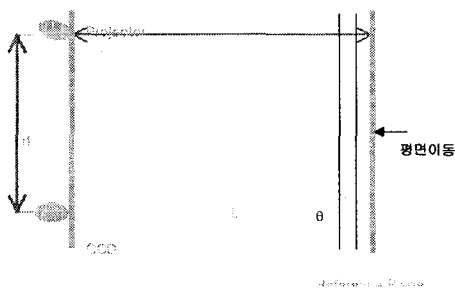


Fig. 4 The measuring system

Fig. 4는 실험 장치의 구성을 나타낸다. 광원으로는 상용 LCD 프로젝터를 사용했으며, CV-M10 흑백 CCD 카메라를 사용하였다. 이미지 처리를 위하여 프레임그래버(Frame grabber)는 Matrox사의 Meteor-II 를 사용하였다. 높이방향에 대한 기준면을 이동시키기 위하여 마이크로미터를 이용하여 5mm 간격으로

높이방향 위상을 측정하였다. 측정 시스템을  $L = 735\text{mm}$ ,  $d=250\text{mm}$ , CCD에서 수직인 기준면에서  $\text{pitch} = 7.58\text{mm}$ 로 구성하였다. 측정 영역은  $118\text{mm} \times 88.5\text{m}$  로 측정하였다.

시스템을 각 조건에 맞게 고정시킨후 높이방향으로 기준면으로부터 높이방향 위상을 측정하였다.

Fig. 5는 물체가 없는 때에 높이가 0mm곳에서 위상지도를 얻은 경우와 기준면에 물체를 올려놓았을 때의 위상지도를 얻은 경우를 나타낸다.

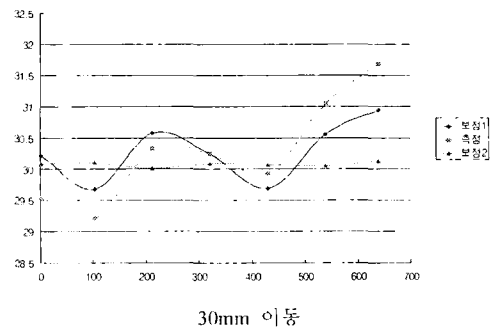
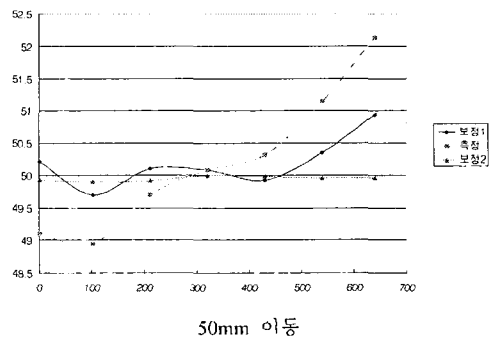


(a) plane (b) object

Fig. 5 Phase maps

#### 3.2 측정 오차 보정

실험적으로 측정된 위상차를 식(10)를 통해 구한 측정값(측정)과 pitch간격을 x축에 따라 다르게 적용시켜 보정한 값(보정1)을 x축방향으로 7점에서, 시스템 구성상 발생하는 오차를 보정하기 위해서 기하학적으로 발생하는 높이에 따른 위상차를 AUTO CAD2002를 구하고, 기존보다 정확한 pitch간격을 식 (12)를 통해 구한 값(보정2)을 비교하였다.



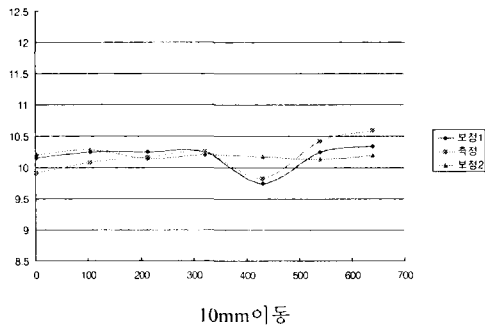


Fig.6 높이에 따른 측정값과 보정값 비교

그림에서 보는 바와 같이 10mm 일때는 측정값에 비해 큰 보정의 차이가 없으나, 높이가 증가할수록 특히 50mm 일것우에 현저하게 보정되는 것을 볼수 있다. 또한  $p(x)$ 식을 보정한 경우(1림에서 보정1)도 어느정도 보정효과를 얻으나 전체적으로  $n(x)$ 와  $\Delta\psi(x)$ 를 모두 보정한 경우(보정2)가 훨씬 정확한 결과값을 얻을 수 있었다.

1림 7은 기준면의 x축 원점을 기준으로 높이를 5mm씩 이동할 경우 기존의 보정1과 본 연구에서 제시한 보정2의 계산값을 비교하여 선형성을 살펴보았으나, 그렇게 크게 차이가 없는 것을 확인하였다.

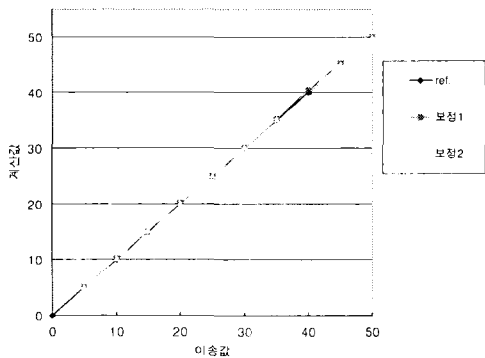


Fig.7 각 높이에 따른 계산값 비교

#### 4. 결론

본 연구는 광학 형상 측정법의 오차기인문제에 대한 보정을 실시하기 위하여, 기본적인 측정시스템을 구성하여 측정을 실시하였다. 확인된 비선형 오차를 보정을 위한 실험으로 마이크로미터를 이용하여 높이방향으로 이동된 측정면의 위상차를 비교하기 위해 실제 광학계의 조건  $L$ ,  $d$ ,  $P_0$ 를 같게 한 후 AUTO CAD2002를 통해 구한 위상차를 구하였다. CCD의 높이방향에 따라, 측정영역이 작아지므로 측

정 과정이 x축의 각 점뿐만 아니라 높이에 따라 다르게 존재하기 때문에 기준면과 측정면 사이의 위상차가 다르다는 것을 확인하였다. 기하학적인 관계식을 통해 x축방향에 따라 기존보다 더 정확한 pitch 값을 알아내어 광학 형상 측정법에 따른 보정 방법을 제안하였으며, 이를 실제 실험 Data에 적용함으로써 보정효과가 좋았음을 보였다. 이러한 보정작업을 해석적으로 이루어질수 있도록 하고 있다.

#### 참고문헌

1. Peisen S. Huang and Fu-Pen Chiang, "Recent advances in fringe projection technique for 3-D shape measurement" SPIE Vol. 3783 pp. 132-142, 1999
2. Zheng-Feng Hu, Cheng-lin Luo and Jian-Qin Zhou, "3-D Diffuse object profilometry based on analysis the intensity of grating pattern" SPIE Vol. 2866 pp 493-496, 1996
3. Wansong Li, Xianyu Su, Likun Su and Liqun Xiang, "A practical coordinate mapping method for phase-measuring profilometry" SPIE Vol. 3558 pp. 125-130
4. Wang, Ming and Zhong, Jinggang, "Automated fringe analysis profilometry of 3-D diffuse objects" SPIE Vol. 2899 pp. 197-203, 1996
5. Giovanna Sasoni, Matteo Carocci, and Roberto Rodella, "Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection : analysis and compensation of the systematic errors" Applied Optics Vol. 38 No.31 pp. 6565-6573, 1999
6. V. Srinivasan, H.C. Liu, and Maurice Halioua, "Automated phase-measuring profilometry : a phase mapping approach" Applied Optics, Vol.24, No.2, pp. 185-188, 1985
7. Jie-Lin Li, Xian-Yu Su, Hong-Jun Su, Sonyoung S. Cha, "Removal of carrier frequency in phase-shifting techniques " Optics and Laser Engineering 30 pp. 107-115, 1998
8. M. Chang and C.-S. Ho, "Phase-measuring profilometry using sinusoidal grating" Experimental Mechanics. pp. 117-122, 1993