

PMP 형상 측정법의 열 변위 보정에 관한 연구

김기승^{1*}, 박윤창²

¹선문대학교 정보통신학과, ²선문대학교 기계ICT융합공학부

A Study on the Compensation of Thermal Errors for Phase Measuring Profilometry

Gi-Seung Kim^{1*}, Yoon-Chang Park²

¹Division of Information Communication, Sunmoon University

²Division of Mechanical and ICT Convergence Engineering, Sunmoon University

요 약 삼차원 형상 측정 기술은 다양한 산업에서 활용하고 있는 기술이다. 그 중, 광 삼각법에 기초한 광학식 삼차원 형상 측정 기술들은 매일 공장에서 오랜 시간 동안 대량의 삼차원 형상 측정을 하고, 미세한 측정 또한 요구되는 반도체 생산품 검사 분야에서 주로 사용된다. 이러한 광 삼각법 기반의 삼차원 측정 장비들의 구성 요소인 광원과 구동 회로는 장시간 작동하게 되면 발열이 나타나게 되고 장시간 작동하며 주변의 온도가 일정하지 않은 상황에 노출되기도 하여 온도로 인한 측정 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 장시간 반복해서 사용하는 PMP(Phase Measuring Profilometry) 형상 측정법에서의 열 변위 보정에 관한 방법을 제안하였다. PMP 형상 측정법 기반의 삼차원 형상 측정 장치를 구현하여 10시간에 걸쳐 물체의 높이와 주변 온도를 측정하는 실험을 진행하였고, 측정된 온도와 높이 값을 이용하여 단순 선형 회귀 분석을 하여 회귀직선을 얻었다. 이 회귀직선을 이용하여 온도에 따른 높이 측정값의 오차를 보정하게 되면 정상적인 측정값에서의 오차 값이 139.88 um(Micrometer) 에서 13.12 um로 보정되는 것을 확인하였다.

Abstract Three-dimensional shape measurement technology is used in various industries. Among them, optical three-dimensional shape measurement techniques based on the optical trigonometry are mainly used in the field of semiconductor product inspection, where large quantities of three-dimensional shape measurements are made daily in factories and fine measurements are also required. The light source and the drive circuit, which are components of three-dimensional measurement equipment based on this optical trigonometry, produce heat generated by prolonged operation, and may be exposed to conditions where the ambient temperature is not constant, resulting in temperature-induced measurement errors. In this study, the compensation method of the Thermal Errors for Phase Measuring Profilometry is proposed. Three-Dimensional Shape Measurement Equipment based on Phase Measuring Profilometry is implemented to measure the height of an object and ambient temperature for 10 Hours, and a regression line was obtained line by making simple linear regression using measured temperature and height values. This regression line was used to correct the error of the height measurement according to the temperature, and thermal error was from 139.88 um(Micrometer) to 13.12 um.

Keywords : Thermal Error, Phase Measuring Profilometry, Regression Analysis, 3D, Moire, Calibration

본 논문은 2018년도 중소벤처기업부의 민간투자주도형 기술창업사업 지원에 의한 연구임. [S2567034]

*Corresponding Author : Gi-Seung Kim(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-10-2231-0683 email: kgs1324kgs@naver.com

Received May 15, 2019 Revised June 4, 2019

Accepted June 7, 2019 Published June 30, 2019

1. 서론

삼차원 형상 측정 기술은 컴퓨터 그래픽스 (Computer Graphics), 3D Printing, 생산품의 형상 검사, 역설계 (Reverse Engineering) 및 의료분야 등의 각종 산업에서 활용되는 기술이다[1-3]. 그 중, 광 삼각법에 기초한 광학식 삼차원 형상 측정 기술들은 미세한 측정이 가능하면서 대량의 삼차원 형상 측정이 요구되는 반도체 생산품 검사 분야에서 주로 사용되며, 여러 연구가 진행되고 있다[4,5]. 대표적인 광학식 삼차원 형상 측정 기술로는 그림자식 모아레, 영사식 모아레를 이용한 측정 기술들이 있다[6].

이러한 반도체 생산품과 같이 대량으로 양산되는 부품의 형상 검사에 사용되는 삼차원 형상 측정 장비들은 주로 장시간 작동하게 된다. 그 중, 주로 사용되는 영사식 모아레의 일종인 위상 측정 형상 측정법(PMP)을 이용한 삼차원 측정 장비들은 광원과 구동 회로로 구성되어 있다. 이 광원과 구동 회로는 장시간 작동하게 되면 회로의 저항 때문에 줄-발열 현상(Joule heating, 저항적 발열)이 나타나게 되고, 삼차원 측정 장비가 장시간 작동하며 주변의 온도가 일정하지 않은 상황에 노출되기도 된다. 위와 같은 원인으로 인해 삼차원 측정 장비가 열의 영향을 받게 되어 패턴 영사 장치가 영사하는 패턴이 변형되거나, 카메라 렌즈의 초점 변화 등의 현상들이 일어나게 된다. 이러한 현상들은 광 삼각법에 기초한 삼차원 측정에 영향을 끼치게 되어 안정적인 삼차원 형상 측정이 힘들어진다[7].

본 연구에서는 PMP 형상 측정법 기반의 삼차원 형상 측정 장치를 구현하여 장시간에 걸쳐 측정 실험을 진행한다. 실험장치 주변 온도를 측정하고 단차 시편(Step Height) 또한 반복적으로 함께 측정하여 높이 값을 얻는다. 실험을 통해 획득한 온도와 위상값들을 활용하여 단순 선형 회귀 분석(Simple Linear Regression Analysis)을 통해 열 변위 보정을 한다. 보정을 마친 후, 측정된 높이 값과 측정 후 오차를 보정 한 높이 값을 비교하여 삼차원 측정 장치가 온도에 따라 측정되는 높이 변화의 폭이 줄어드는 것을 확인한다.

2. 삼차원 형상 측정

2.1 PMP 형상 측정법

PMP 형상 측정법은 영사 장치(Pattern projector)를 이용하여 일정한 격자 패턴을 측정 대상 물체에 영사를 시켜 반사되는 빛을 카메라로 획득하여 물체의 형상에 따라 변형된 패턴(Object Pattern)과 변형되지 않은 기준면 패턴(Reference Pattern)의 위상(phase)차를 이용하여 측정 대상의 3차원 형상을 얻는 기술이다[7-9].

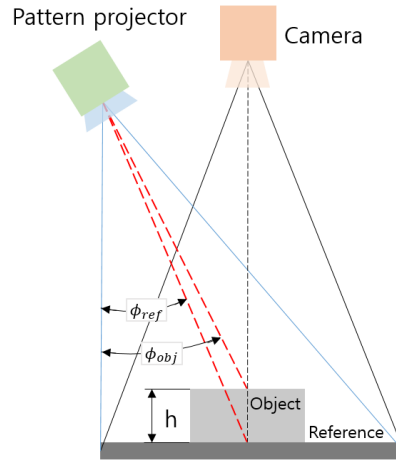


Fig. 1. PMP system

Fig. 1은 PMP 형상 측정을 위한 기본적인 시스템을 도시화한 것이다. Pattern projector에서 정현 파형 밝기 정보를 가지는 패턴(sinusoidal grating pattern)을 투영하고 기준면(Reference)과 측정 물체(Object)에 영사하게 되는데 이때 반사된 빛을 camera에서 영상으로 획득한다.

이렇게 구성된 PMP 시스템에서 격자 패턴을 일정량씩 이송(Phase Shift)하면서 각각의 영상을 획득하게 된다. 이후 이 N개의 영상으로부터 각 픽셀의 광량 값(I_n)을 관찰하여 해당 픽셀에서의 위상을 구하면, N개의 영상 이미지를 통해 위상을 구하는 다음과 같은 식이 나온다[9].

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=0}^{n-1} I_n \sin 2\pi n / N}{\sum_{n=0}^{n-1} I_n \cos 2\pi n / N} \quad (1)$$

Where, ϕ denotes phase

Eq. (1)을 바탕으로 한 픽셀에서의 기준면의 위상($\phi_r = \phi_{reference}$)과 측정 물체의 위상($\phi_o = \phi_{object}$)을 구하고 두 위상의 차이, 모아레 위상($\phi_m = \phi_{moire}$)을 구할 수 있게 된다.

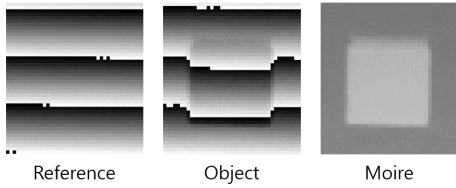


Fig. 2. PMP images

Fig. 2은 촬영한 단차 시편의 전체 픽셀 위상 계산 결과값을 보기 쉽도록 명암을 통해 나타낸 이미지들이다. 이렇게 계산된 Moire 위상값의 범위는 $-\pi \sim +\pi$ 로 나오게 된다. 이 위상값을 이용하여 실제 높이 값(um, 마이크로미터)을 구한다.

2.2 높이 값 추정

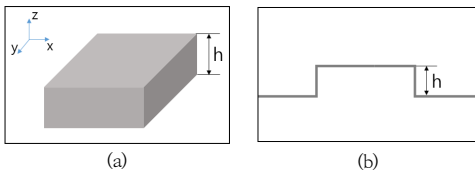


Fig. 3. Height value of Step Height
(a) 3D Shape (b) xz plane cut surface

평면에 올라간 단차 시편은 삼차원 측정이 되었을 때, Fig. 3 (a)와 같은 형상을 띄게 된다. 이를 xz 평면과 평행한 평면으로 자른 단면은 Fig. 3 (b)와 같은 형상이 보이게 되어 높이 값(h)을 얻을 수 있다. Fig. 4는 실측된 단차 시편의 3D 모델이다.

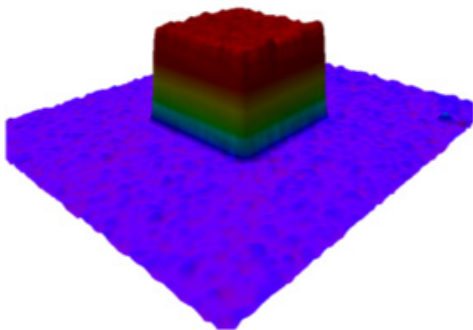


Fig. 4. Measured Step Height 3D-Model

3. 열 변위 보정

3.1 회귀 분석

본 논문에서는 열 변위를 온도의 단순 1차 함수로 가정하고 열 변위를 해석한 다음 간접적으로 보정하는 단순 선형 회귀 분석 방식을 사용한다.

$$h = \beta_0 + \beta_1 T_i + \epsilon \tag{2}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Eq. (2)에서 ϵ 은 오차이고, T_i 는 독립변수로 i 회차에서 측정된 온도를 나타낸다. 미지의 계수 β_0, β_1 은 온도 보정량 상관 계수이며, 회귀직선의 추정 식은 최소제곱법(method of least squares)을 사용하여 구한다[10].

$$\hat{h}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 T_i \tag{3}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{Th}}{S_{TT}} \tag{4}$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{h} - \hat{\beta}_1 \bar{T}$$

Eq. (3)은 최소제곱법을 통하여 구한 회귀직선의 추정 식이고 Eq. (4)은 최소제곱법의 추정을 통하여 얻은 최소제곱 추정값(least squares estimates)이다. \bar{T} 는 T 값의 평균, S_{Th} 는 T 에 대한 h 의 편차 제곱 합, S_{hh} 는 h 에 대한 h 의 편차 제곱 합이다. 이 식을 통해 나온 h 값은 선형 보정을 위한 높이 값이 될 것이다.

3.2 실험

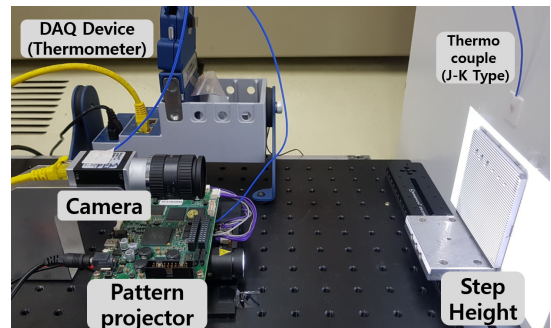


Fig. 5. Experiment setup (PMP system)

Fig. 5은 실제 실험장치를 구성한 사진이다. 여기서

온도는 데이터 수집 장치(Data Acquisition, 이하 DAQ)를 이용하여 카메라 이미지와 함께 PC로 계측한다.

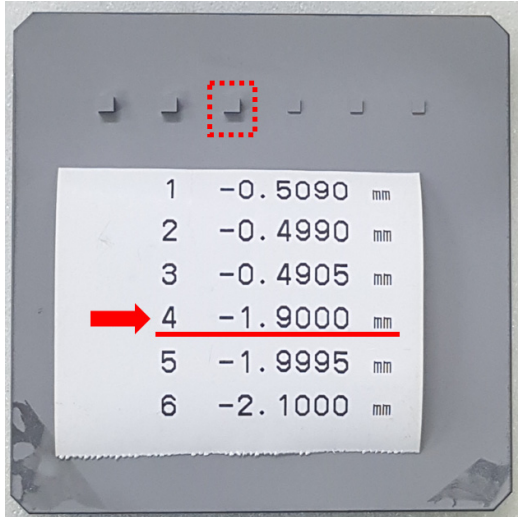


Fig. 6. Step Height

Fig. 6은 실험장치에서의 측정 대상인 단차 시편이다. 이 중, 오른쪽에서 4번째의 1.9000 mm(20±0.1 °C 에서의 기준 높이) 단차 시편을 촬영하였다.

실험은 10시간에 걸쳐 90초 간격으로, 총 400번의 단차 시편의 높이와 장치 주변 온도를 측정하였다.

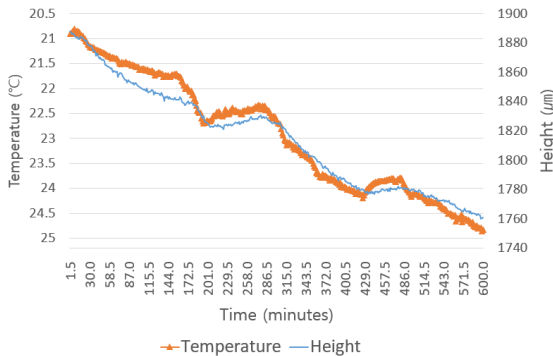


Fig. 7. Experiment result

실험 결과, Fig. 7의 그래프를 보면 주변 온도(세모)가 점차 상승함에 따라 측정되는 높이(직선)가 점차 감소하는 모습을 볼 수 있다.

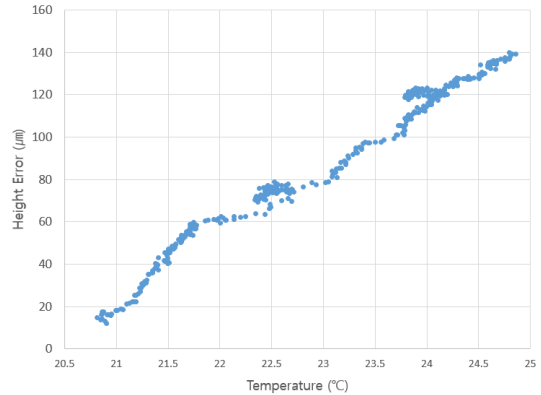


Fig. 8. Distributed graph of Height Error for Temperature

또한, Fig. 8의 그래프를 보면 측정 시 온도에 따라 오차가 생기는 것을 확인할 수 있고, 본 실험에서는 최대 139.88 μm 의 오차가 나왔다.

3.2 실험 결과 분석

측정된 값들을 바탕으로 선형 회귀 분석을 하여 추정식을 얻는다. 최소제곱 추정값을 획득하기 위해 Eq. (4)에 필요한 값들을 넣어 계산하면 다음과 같이 나온다.

$$\begin{aligned} \bar{T} &= 22.92 \\ \bar{h} &= 85.09 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_{(Tn)} &= 539.87 \\ S_{(TT)} &= 16063.10 \end{aligned} \quad (6)$$

Eq. (5), (6)의 값을 이용하여 Eq. (7)의 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$ 을 구하면, 온도에 대한 높이 값의 회귀직선 추정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_1 &= 29.7538 \\ \hat{\beta}_0 &= -596.8967 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\hat{h} = 29.7538 T_i - 596.8967 \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Eq. (8)에 온도 값을 대입하여 측정된 높이 값을 보정 후, 기존의 측정된 높이 값과 비교하여 그래프를 그리면 Fig. 9의 그래프가 나온다.

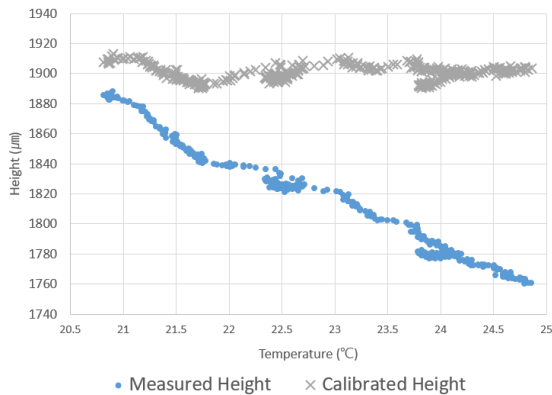


Fig. 9. Distributed graph of Measured & Calibrated Height for Temperature

위와 같이 온도에 따른 높이 측정값의 오차를 보정하게 되면, 최대 높이차가 보정 이후, 보정 이전의 139.88 µm보다 감소한 13.12 µm로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 장시간 반복해서 사용하는 PMP 형상 측정법에서의 열 변위 보정에 관한 방법을 제안하였다. PMP 형상 측정법 기반의 삼차원 형상 측정 장치를 구현하여 10시간에 걸쳐 물체의 높이와 주변 온도를 측정하는 실험을 진행하였고, 측정된 온도와 높이 값을 이용하여 단순 선형 회귀 분석을 하여 회귀직선을 얻었다. 이 회귀직선을 이용하여 온도에 따른 높이 측정값의 오차를 보정 하게 되면 정상적인 측정값에서의 오차 값이 139.88 µm에서 13.12 µm로 보정되는 것을 확인하였다.

References

[1] Chang-Kyu Song, Seung-Woo Kim, Juneho Park, "Automatic Measurement of 3-Dimensional Profile of Free-Formed Surfaces by Using Touch-Trigger Probes", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.17, No.2, pp.407-415, 1993. DOI: <http://dx.doi.org/10.22634/KSME.1993.17.2.407>

[2] Z. M. Zhang, M.E. Jung, J. P. Hong, "Measurement and Evaluation of 3D Printing Quality", *Proceedings of KSPE 2016 Spring Conference*, Korean Society for Precision Engineering, pp.912-913, 2016.

[3] Hwa Yeong. Choi, Kyung Uk. Roh, "Surface Recession Visualization of Ablative Materials Using

Three-dimensional Profilometer and High-speed Camera", *KSAS 2018 Spring Conference*, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, pp.657-660, 2018.

[4] Sang Hyun. Cho, Heung Moon. Choi, "An Implementation of 2D/3D Complex Optical System and its Algorithm for High Speed, Precision Solder Paste Vision Inspection", *The Institute of Electronics Engineers of Korea - Signal Processing*, Vol.41, No.3, pp.139-146, 2004.

[5] Yoon-Chang. Park, Seong-Joon. Ahn, Moon-Ho. Kang, Young-Chul. Kwon, Seung-Joon. Ahn, "Phase error compensation for three-dimensional shape measurement based on a phase-shifting method", *Journal of academia-industrial technology*, Vol.10, No.11, pp.3023-3030, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.11.3023>

[6] Yoon-Chang. Park, "The Principle and Applications of Moire Phenomenon", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.17, No.6, pp.25-29, 2000.

[7] Maurice. Halioua & Hsin-Chu. Liu, "Optical Three-Dimensional Sensing by Phase Measuring Profilometry", *Optic and Lasers in Engineering*, Vol.11, pp.185-215, 1989. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0143-8166\(89\)90031-6](http://dx.doi.org/10.1016/0143-8166(89)90031-6)

[8] Yoon-Chang. Park, Kyung-Min. Jeong, "Multiphase Homodyne Laser Interferometer with Four Bucket", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp.203-207, 1999.

[9] Y. T. Lee, Y. J. Kang, Y. S. Hwang, "A Study on the Phase calibration of the phase measuring profilometry", *Korean Society Of Precision Engineering*, Vol. 06, pp. 421-424, 2002.

[10] Sung Hyun. Park, Design of experiments. pp.259-274, minyoungsa, 1985.

김기승(Gi-Seung Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 선문대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2019년 2월 : 선문대학교 일반대학원 정보통신공학과 (석사과정)

<관심분야>

3D 측정, 컴퓨터비전, 제어계측

박 윤 창(Yoon-Chang Park)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 한국과학기술원 정밀공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계ICT융합공학부 정보통신공학과 교수

〈관심분야〉

정밀기계, 3D 측정