

그림자식 모아레를 이용한 형상측정법의 정확도 개선에 관한 연구

A Study on the Improvement of Accuracy of Shape Measurement in the Shadow Moire Method

박경근, 박윤창, 정경민
선문대학교 기계 및 제어공학부

Kyung-keun Park, Yoon-chang Park, Kyung-min Jeong
Sunmoon Univ. Div. of Mechanical and Control Engineering

Abstract

Generally, When we measure of object 3D surfaces with phase shifting shadow moire method It is use of optical system consist of light source, grating, and ccd camera. At this time, It is important parameter that vertical distance of grating and camera, grating and light source, and horizontal distance of camera and light source. When use camera consist of complex lens vertical distance of grating and camera is unknown parameter. From this cause equivalent wave length of moire fringe is uncertain. In this study, We exactly obtain a vertical distance of grating and camera so improve on measurement accuracy

Key Word : shadow moire, phase shifting, shape measurement, grating, equivalent wave length

최초로 2개의 격자무늬에 의한 모아레 무늬를 해석하였고 이 현상이 물체의 미세한 움직임을 측정할 수 있는 과학적인 도구임을 제시하였다. 그 후 1887년 Right[2]에 의해 격자의 형태에 대한 연구도 이루어 졌으며 수직 격자 이외에도 동심원 격자에 의한 모아레 무늬를 이용하여 원운동을 해석할 수 있음도 밝혀졌다. 이러한 실험적인 시도가 1920년대에 들어서며 Ronchi[3], Raman[4]등에 의해서 이론적으로 적립이 되었다. 1940년대에 이르러서는 모아레를 이용하여 물체의 평면변위를 측정하는데 이용되었다. 1950년대 이후에는 모아레 현상이 물체의 변형에 의한 응력해석 등에 효과적으로 이용됨으로써 여러 측정 분야에서 활발히 연구가 진행되었다. 이렇듯 평면변위에만 사용되어지던 모아레현상은 1970년 Takasaki[5]와 Meadows[6]등이 3차원형상측정으로의 응용을 실현시킴으로써 일대 전기를 맞게되었다 이상에서 보았듯이 모아레현상을 이용한 측정에는 측정 대상에 따라 평면변위 측정을 위한 평면모아레 (in-plane moire)와 물체의 3차원변위 측정을 위한 입체모아레로 구분할 수 있다.

1. 서 론

1.1 연구배경

모아레란 비슷한 주기를 갖는 패턴(Periodic pattern)이 두 개 이상 겹쳐졌을 때 두 격자의 주기보다 큰 주기를 갖는 무늬가 생성되는데 이 무늬를 일컫는 말이다. 1874년 Lord Rayleigh[1]는

1.2 연구현황

입체모아레는 모아레무늬를 만드는 방법에 따라 그림자식모아레(Shadow moire)와 영사식모아레(Projection moire)로 나누어진다. 초기에 모아레무늬 해석에는 프링지추적(Fringe contouring) 기법[7]이 사용되어졌다. 그러나 이 간섭무늬추적 방법은 낮은 측정분해능 및 낮은 불확도로 인해

서 측정의 정밀도를 가지지 못하였다. 그후 여러 가지 해석기법들이 발표되었으나 제일 괄목할만한 발전은 광위상간섭법(Phase shifting method)[8-9]을 이용한 모아레무늬의 해석이다. 모아레무늬의 광축방향으로의 광강도분포가 가간섭성이 높은 두 광파의 간섭에 의한 광강도분포와 같다는 가정에서 출발하는 위상천이모아레간섭법을 사용하면 기존의 프린지추적에 비해서 수백배의 측정분해능 및 불확도 향상을 가져올 수 있게 되었다. 1987년 M. Kujawska[10]은 모아레프리지의 해석에 3-buckets 위상천이 기법을 사용하였다. 그 후 Gerard Mauvosin 등은 위상천이를 주는 방법에 대해서 연구를 수행하여 물체를 움직이는 방법이 제일 효과적임을 보여주었고 위상천이법을 모아레에 적용하는데 있어서 모아레무늬의 등가파장을 구하기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 그림자식 모아레를 사용하여 3차원 형상을 측정함에 있어 그 정확도를 높이기 위해 모아레무늬의 특성을 고려하여 광학계를 구성함으로써 초기 광학계가 갖는 오차를 줄여 측정오차를 감소시킴으로써 보다 정확한 결과가 나오도록 하였다.

2. 본 론

2.1 기본원리

일반적인 그림자식 모아레법의 실험광학계를 그림1에 보여주고 있다. 측정하고자하는 물체 앞에 기준격자를 위치시키고 광원으로부터 빛을 조사하게 되면 기준격자를 통과하여 물체표면에 생긴 그림자를 다시 기준격자를 통하여 카메라가 봄으로써 모아레늬를 얻을 수 있게 된다. 카메라에 잡힌 영상은 frame grabber를 통해 PC로 전송되어 처리된다.

실제적으로 그림자식 모아레법을 사용하여 측정물체의 정확한 높이를 측정하기 위해서는 그림2에서와 같이 몇개의 파라메타가 중요한 의미를 갖는다. 물체위의 임의의 한점 P에 입사하는 빛의 각도를 α , P로부터 수광소자에 입사하는

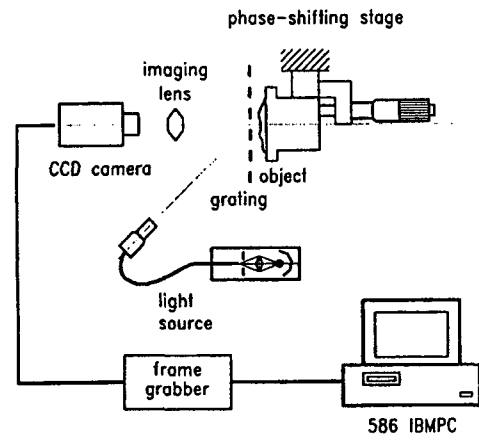


그림1 일반적인 그림자식모아레의 광학계 구성

각도를 β , 그 점에서의 모아레차수를 N_p 라고 하고 격자의 피치를 g 라고 하면 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$N_p g = W \tan \alpha + W \tan \beta$$

$$W = \frac{g}{\tan \alpha + \tan \beta} N_p$$

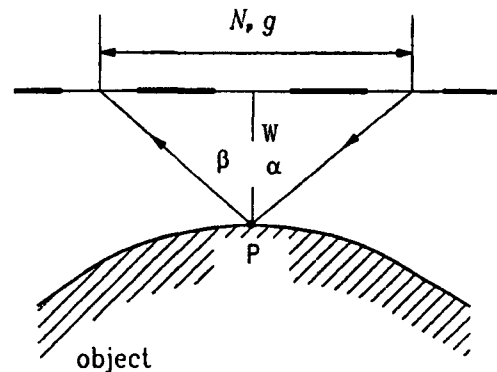


그림2 그림자식모아레의 기본적인 파라메타

각도 α, β 는 측정물의 위치에 따라서 변하는 값이다. 이로인해 N_p 가 같은 물체의 위치라

도 서로 다른 높이를 갖게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 그림3(a)와 같이 광원과 수광소자를 격자면에서 수직거리가 같게 놓으면 z축 방향으로의 변위가 오직 모아레 차수에 의해 결정되도록 할 수 있다.

$$\tan \alpha + \tan \beta = \frac{D}{L+W} \approx \frac{D}{L} = K$$

$$W = \frac{g}{K} N_p$$

L이 W에 비해 충분히 클 때 L+W는 L로 근사할 수 있다. 또 그림3(b)와같이 D=L로 하면 K=1이 되어 식을 더욱 간단히 할 수 있다.

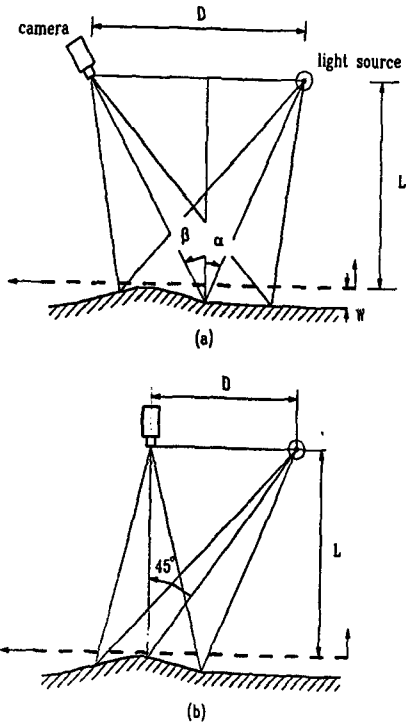


그림3 Light Source 와 Camera의 위치

그림자식모아레의 기하광학적해석을 그림4를 통해 보면 먼저 물체 앞에 놓인 격자의 투과도 $T(x)$ 를 다음과 같이 사인함수로 가정한다.

$$T(x) = \frac{1}{2} (1 + \sin \frac{2\pi x}{g})$$

광원에서 시작된 빛은 점 A를 지나 측정점 P에서 반사되어 점 B를 지나 수광소자로 들어가는 경로를 가지게 된다. 수광소자의 입장에서 보는 광강도는 다음과 같이 표현된다.

$$I = I_0 T_A R_P T_B$$

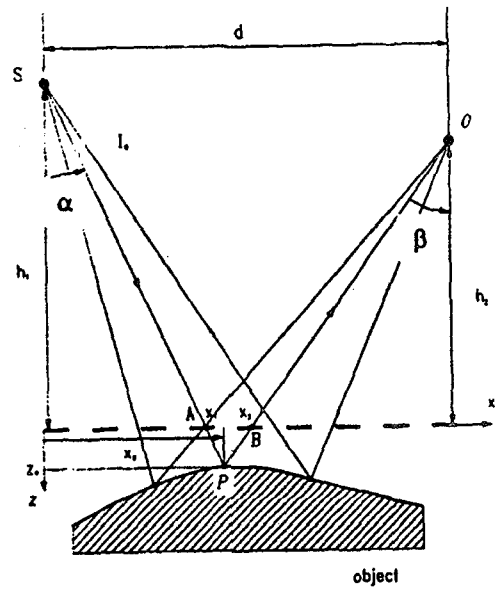


그림4 그림자식모아레의 기하광학적 해석

I_0 는 광원의 광강도이고 T_A , T_B 는 점 A,B에서의 격자투과도이고 R_P 는 점 P에서의 물체의 반사도를 나타낸다.

[에 관한 식을 전개하여 그중 모아레무늬를 형성하는 항만을 전개하면 최종적으로 증폭비 A를 포함하는 아래의 식으로 표현된다.

$$I_M = A \cos \frac{2\pi}{g} (x_2 - x_1)$$

$$x_1 = x_p - z_p \tan \alpha$$

$$x_2 = x_p + z_p \tan \beta$$

$$\tan \alpha = \frac{x_p}{h_1 + z_p}$$

$$\tan \beta = \frac{d - x_p}{h_2 + z_p}$$

모아레 무늬의 위상(ϕ)과 모아레차수(n)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{2\pi}{g} (x_2 - x_1) \\ &= \frac{2\pi z_p}{g} \left(\frac{d - x_p}{h_2 + z_p} + \frac{x_p}{h_1 + z_p} \right) \\ &= 2\pi n \end{aligned}$$

$$n = \frac{z_p}{g} \left(\frac{d - x_p}{h_2 + z_p} + \frac{x_p}{h_1 + z_p} \right)$$

위 식을 정리하면 그림자식모아레의 무늬에 대한 일반식을 얻을 수 있다.

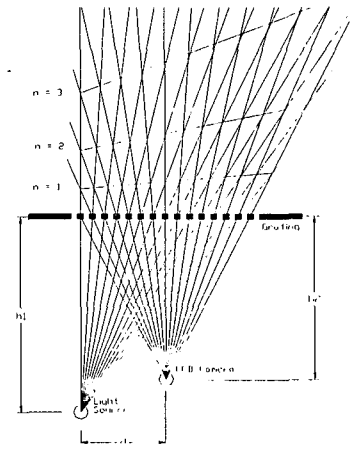
$$\begin{aligned} (ng - d) z_p^2 + \\ (ng(h_1 + h_2) - dh_1 + (h_1 - h_2)x_p) z_p + \\ h_1 h_2 ng = 0 \end{aligned}$$

위 식을 보면 모아레무늬가 x_p 와 z_p 의 함수로 표현된다. 즉 모아레무늬는 격자평면과 등고선이 이루면서 형성되어지는게 아니고 물체의 위치에 따라 바뀌어짐을 알 수 있다. 위 식에서 $h_1 = h_2 = h$ 로 놓으면 x_p 항이 소거됨으로써 모아레무늬가 오직 z_p 만의 함수가 되도록 할 수 있다. 따라서 최종적으로 구하고자하는 z_p 를 알기 위해서는 절대모아레차수 n 을 산출해야만 한다. 절대모아레 차수를 구하기는 쉽지 않은 문제로 아직도 정확한 해법은 제시되지 않고 있다.

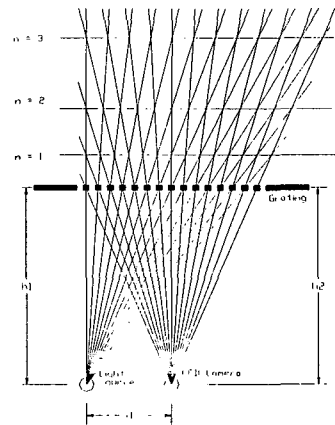
$$n = \frac{1}{g} \left(\frac{d z_p}{h + z_p} \right)$$

$$z_p = \frac{ng h}{d - ng}$$

그림자식 모아레의 광학계를 구성함에 있어 h_1 과 h_2 를 같게두는 것은 위에서 보인것과 같이 식을 간단히하기 위해서 만의 문제는 아니다. 그림5는 h_1 과 h_2 가 다른경우와 같은경우에 대해 각각 생성되는 모아레무늬의 형상을 평면적으로 그려본 것이다. (a)는 $h_1 > h_2$ 인 경우로 모아



(a) $h_1 \neq h_2$



(b) $h_1 = h_2$

그림5 h_1 과 h_2 변화에 의한 모아레무늬의 차이

레무늬가 우상단에서 좌하단으로 경사져있음을 알 수 있다. (b)는 $h_1 = h_2$ 인 경우로 모아레무늬가 격자면과 수평을 이루고 있음을 알 수 있다. (a)의 경우는 측정대상물에서의 같은 높이를 같은 서로다른 측정점에서 측정값이 서로 다르게 됨을 알 수 있다.

2.2 실험

실험을 위하여 그림6와 같이 실험 광학계를 구성하였다.

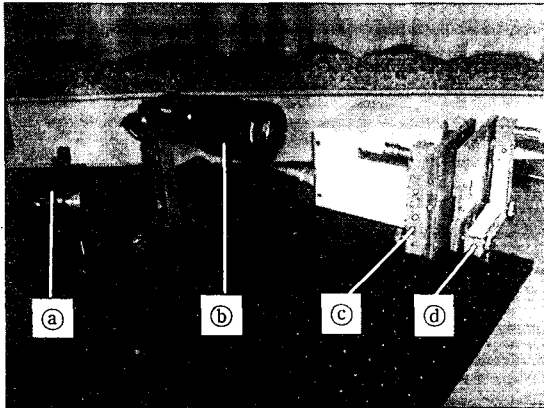


그림6 실험광학계

그림5에서 ㉑는 할로젠 광원이고 ㉒는 CCD 카메라이고 ㉓는 반도체 식각공정으로 제작된 0.1mm Pitch를 가지는 격자를 붙여 고정시키는 보정판이고 ㉔는 수평면을가지는 시료를붙여 고정시킨 보정판이다. 격자로부터 광원까지의 수직거리는 250mm로 하였다. 격자뒤에 위치한 시료는 격자로부터 3° 기울어져서 있다. 시료가 기울어져 있으므로 격자면을 기준으로 시료까지의 거리가 하단부에서 상단부로 갈수록 점점커지게 된다. 따라서 광원으로부터 빛을 조사하고 CCD 카메라에 맺히는 모아레무늬는 여러개의 직선으로 그림7과 같이 나타난다. 그림7을 보면 직선이 우상단에서 좌하단으로 기울어진것을 볼수 있는데 이는 그림5(a)에서 보듯 격자로부터 광원까지의 거리보다 격자로부터 카메라 렌즈의 중심까지의 거리가 더 작다는 것을 나타낸다. 카메라

의 망원렌즈를 조작하면서 모아레 무늬가 수평이 되도록 맞추었다. 이때 수평의 여부는 화상처리를 통하여 픽셀의 기울기의 평균이 최소가되는 무늬로 결정하였다. 이때의 모아레 무늬를 보면 그림8과 같다.

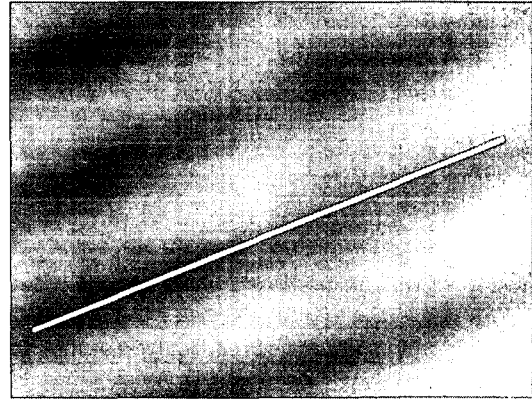


그림7. 보정되지 않은 광학계상의 모아레무늬

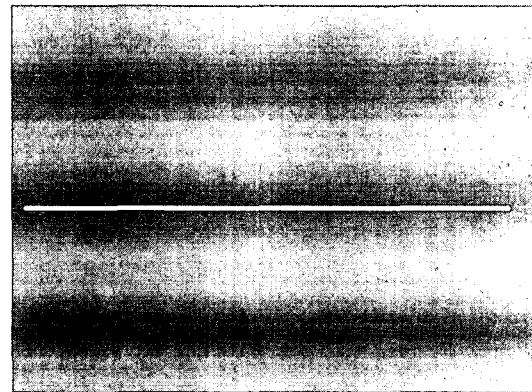


그림8. 보정된 광학계상의 모아레무늬

3. 결 론

실험을 통하여 그림자식 모아레의 경우 광학계에의해 측정대상물에 맺히는 모아레무늬의 등차수면이 평면으로 형성되기 위해서는 격자로부터 광원까지의 거리와 격자로부터 카메라의 렌즈 중심까지의 거리가 같아야 함을 알았다. 카메라의 렌즈가 복잡하게 구성되었을 경우 이를 알수 없으므로 평면시료를 사용하여 광학계를 정확히 보정함으로 측정에서의 수평방향으로의 오차를

줄일 수 있다.

4. 후 기

본 연구는 과학재단의 특정기초(장기)연구과
제의 지원으로 수행되었음.
(과제번호 : 98-0200-11-01-5)

참고문헌

1. Load Rayleigh, Philos. Mag. 47, 81 (1874);
47, 193 (1874)
2. A. Righi, Nuovo Cimento 21,203 (1887); 22,
10 (1888)
3. V. Ronchi, Attualita Scitifiche, No. 37, N.
Zanidelli, Bologna, 1925, Chap. 9.
4. C. V. Raman and S. K. Datta, Trans. Opt.
Soc. 27, 51 (1925-1926)
5. H. Takasaki "Moire Toporgaphy" Appl. Opt.
Vol.9 No. 6, (1970)
6. D. M. Meadows, W. O. Johnson, and J, B,
Allen, Appl. Opt. 9, 942(1970)
7. Masanori Idesawa, Toyohiko Yatagai and
Takashi Soma "Scanning moire method and
automatic measurement of 3D shapes" Appl.
Opt. Vol.16 No8 (1977)
8. C. L. Koliopoulos, "Interferometric Opical
Measurement Techniques", Ph.D. Dissertation,
Optical Sciences Center, U. Arizona (1981)
- 9, K. Creath, "Phase-Measurement
Interferometry Techniques", Progress in Optics
26, 349-398 (1988)
10. M. Kujawinska, "Use of phase-stepping
automtic fringe analysis in moire
interferometry" Appl. Opt. (1987)