

# 위상이동 그림자 무아레법을 이용한 3차원 물체의 형상측정 (Measurement of three dimensional object shape by means of the phase-shifting shadow moiré)

유원재\*, 노경완(전북대 대학원), 강영준(전북대 공대)

W. J. Ryu\*, K. W. Rho(Graduate School, Chonbuk Univ.) and Y. J. Kang(Chonbuk Univ.)

## ABSTRACT

The shadow moiré is one of the optical techniques which is able to give contour lines of an object with respect to a master grating plane. The moiré patterns are issued from the superposition of a master grating and its shadow projected on the surface of an object. In case of the classical shadow moiré method, the sensitivity was a few tenths millimeters. Generally, it is difficult to use a phase shift method in shadow moiré because it is impossible to obtain uniform phase shifts on the whole field. But in this study we use the fact that if the depth of object is much less than the distance between the observer and the master grating, and the object is displaced perpendicularly to the grating plane, phase shifts are almost uniform. Finally we obtained a better resolution by using a phase shift procedure and applied the phase shifting shadow moiré to three dimensional shape measurement.

**Key Words** : shadow moiré(그림자 무아레), phase shift(위상 이동), contour line(등고선), superposition(중첩), shape measurement(형상측정), sensitivity(민감도)

## 1. 서론

무아레란 비슷한 주기를 갖는 두 개의 격자를 겹쳤을 때 보다 큰 주기를 갖는 무늬가 생기는 현상으로 간섭현상과 마찬가지로 계속 분야에 다양하게 이용되고 있다. 간섭현상과 비교한다면 가 간섭광(coherent light)을 광원으로 쓸 필요가 없다는 장점이 있으나, 측정의 정밀도가 낮다는 단점이 있어서 주로 인간의 몸과 같은 부드러운 곡면을 갖는 물체를 측정하는데 쓰여 왔다.<sup>(3)</sup> 무아레 방법에 의한 측정 방법에는 시스템의 광학적 구성에 따라 크게 2가지로 나누는데, 영사식 무아레(projection moiré) 방법과 그림자식 무아레(shadow moiré) 방법으로 나눈다. 전자는 두 개의 격자를 설치하여 그 중 하나를 움직여 위상이동을 쉽게 할 수 있다. 그러나 이 방법은 시스템의 광학적 정렬이 매우 정밀해야 하는 반면에 후자는 시스템의 요소배열이 매우 단순하므로 측정이 용이하고 간단한 요소변경만으로 오차를 줄일 수 있다.<sup>(3)</sup> 그래서 본 연구에서는 지금까지의 무아레 방법의 결점인 낮은 분해능을 향상 시키고

측정결과에의 정량적인 해석을 위해 위상 이동방법을 적용하였다. 또한 그림자 무아레 방법의 원리와 위상이동을 달성하기 위해 어떤 변수를 변경해야 하는지 알아보고, 위상이동을 통해 얻어진 각 상으로 3차원 형상을 구현하였고 그 실험 결과와 유용성에 대해 논의하였다.

## 2. 그림자 무아레의 원리

고전적 그림자 무아레에서는 기준 격자와 물체에 비치는 기준격자의 그림자가 서로 중첩되어 제 3의 무늬를 만들게 된다. 만약, 격자의 주기가  $p$ 이고 격자면을  $x$ - $y$  평면으로 잡고, 격자선들의 방향에 수직인 축을  $x$ , 격자선들과 평행한 축을  $y$ , 격자면에 수직인 축을  $z$ 로 잡을 때 격자면의 투과도가 다음과 같은 격자를 생각하자.

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

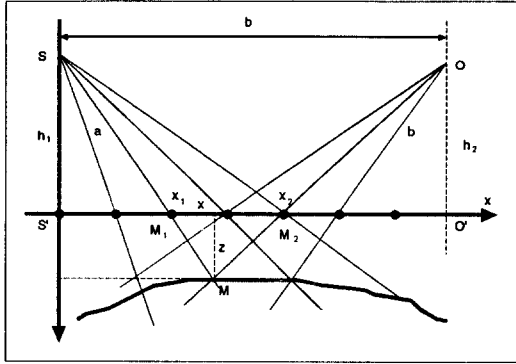


Fig. 1. Configuration of shadow moiré

S : light source, O : observer

Fig. 1. 에서와 같이 빛은  $x_1$ 을 지나 물체상의 점에 도달하게 된다. O점에서 관찰된 빛의 강도는 다음과 같이 나타나게 된다.<sup>(1)</sup>

$$I(O) = H(M) \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi}{p} (x_2 - x_1) \right] \quad (2)$$

여기서,  $H(M)$ 은 물체표면의 점 M의 주위의 표면상태뿐만 아니라, 그것의 위치, 광원의 강도에 따라 달라진다. 만약 코사인 변수를  $\phi$ 라 하면,

$$(x_2 - x_1) = \phi \frac{p}{2\pi} \quad (3)$$

여기서  $\phi = k2\pi$ 이고,  $k$ 는 무아레 무늬의 차수이다. Fig. 1.로부터,

$$\begin{aligned} x_1 &= x - z \tan \alpha \\ x_2 &= x + z \tan \beta \end{aligned} \quad (4)$$

로 나타낼수 있고, (3)식과 (4)식으로 인해

$$\phi = \frac{2\pi z}{p} \left( \frac{x}{h_1 + z} + \frac{b - x}{h_2 + z} \right) \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다.

여기서 위 식을 간단히 하기 위해 광원과 관찰자를 같은 높이에 둔다면 (5)식은

$$\phi = \frac{2\pi}{p} \frac{bz}{h + z} \quad (6)$$

으로 정리된다.

### 3. Quasi-Heterodyne 그림자 무아레

그림자 무아레 방법에 위상이동법을 적용시키기 위한 몇가지 다른 방법들이 있다. 즉, 식(6)에서의 위상  $\phi$ 를  $\phi + \delta\phi$ 로 이동시키기 위해서는 식(6)의 4가지 파라메타인  $b, p, h, z$ 를 각각 변경시킬 수 있다. 따라서 각 파라메타의 변화에 의한 이동되는 위상은,

$$\delta\phi_b = \frac{2\pi}{p} \frac{z}{(h+z)} \delta b \quad (7)$$

$$\delta\phi_h = -\frac{2\pi}{p} \frac{bz}{(h+z)^2} \delta h \quad (8)$$

$$\delta\phi_p = -\frac{2\pi}{p^2} \frac{bz}{(h+z)} \delta p \quad (9)$$

$$\delta\phi_z = -\frac{2\pi}{p} \frac{bh}{(h+z)^2} \delta z \quad (10)$$

과 같이되고, 각 파라메타  $b, h, p, z$ 가 변하는 의미는,

- 광원 또는 관찰자의 이동
- 광원과 관찰자의 이동
- grating의 피치간격의 변화
- 물체를 grating에 대해 수직으로 움직임

과 같이 정리된다. 그러나 위 식들은 모두 grating과 물체와의 거리  $z$ 에 의존하기 때문에 일정한 위상이동을 달성할 수 없다.<sup>(1)</sup> 그러나 측정할 때  $z$ 와  $h$ 의 관계에서  $z \ll h$ , 즉 광원과 grating과의 거리보다 grating과 물체와의 거리가 매우 작으면 (10)식은

$$\delta\phi_z = 2\pi \frac{b}{ph} \delta z \quad (11)$$

과 같이 되고, 물체와 grating과의 거리  $z$ 를 변경시키는 경우만이 거의 일정한 위상이동을 달성할 수 있다.<sup>(1)</sup>

따라서 측정시, 이동하고자하는 위상을 정하면 그에 따라 물체가 이동해야 하는 거리를 정할 수 있다.

#### 4. 위상정보를 이용한 3차원 형상구현

화면에 잠긴 물체의 각 점에서의 강도(intensity)는 다음과 같이 나타낸다.

$$I(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos[\phi(x, y) + \alpha_i]\} \quad (12)$$

여기서,  $I(x, y)$ 는 한점의 강도,  $I_0(x, y)$ 는 평균강도,  $\gamma(x, y)$ 는 가시도(visibility),  $\phi(x, y)$ 는 위상, 그리고  $\alpha_i$ 는 이동하는 위상값이다.<sup>(4)</sup>

기준 격자에 수직으로 이동시키며 측정 물체를 PC에 연결된 CCD 카메라로 4개의 상을 얻는다.

Four-Frame 위상이동법에 의하여 얻어진 4개의 화상의 강도는 각각 다음과 같이 나타낸다.

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos[\phi(x, y)]\} \quad (12)$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) \left\{1 + \gamma(x, y) \cos\left[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \quad (13)$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi]\} \quad (14)$$

$$I_4(x, y) = I_0(x, y) \left\{1 + \gamma(x, y) \cos\left[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right]\right\} \quad (15)$$

위상이동법으로 측정되어진 각 점에서의 위상  $\phi(x, y)$ 는

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (16)$$

그러나 이 위상값들은  $-\frac{\pi}{2}$ 에서  $\frac{\pi}{2}$ 사이의 값들만을 가지게 되므로 Demodulation과정을 거쳐서 최종적으로 물체 각점의 실제 위상을 구하게 된다.

#### 5. 실험 방법

일반적으로 물체표면에 나타나는 무아레 무늬는 간격이 일정하지가 않다. 따라서 (11)식에서 계산하여 얻어낸  $\delta z$  값을 확인하기 위하여 임의의 차수의 무늬를 선택하고 그 차수의 무늬가 위치하는 거리를 계산하고 흰 평판에서 한 주기의 간격을 재어서 계산한 값과 비교하여 두 값이 거의 일치한다는 것을 확인하였고 다른 차수의 무늬에서도 마찬가지로임을 알 수 있었다. 실험장치의 개략도가 Fig. 2에 나타나

있다.

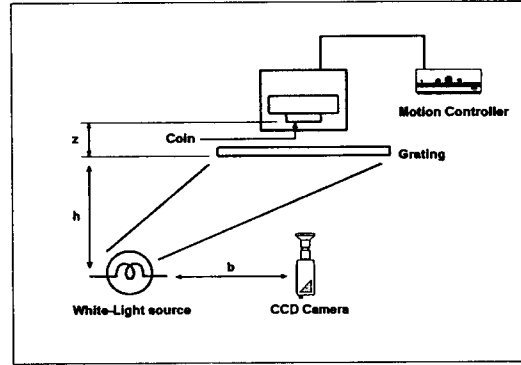
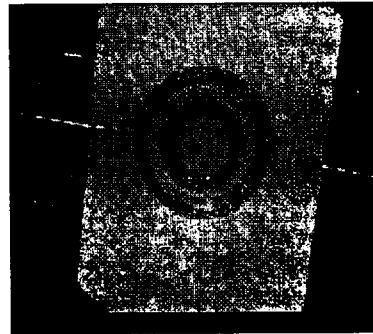


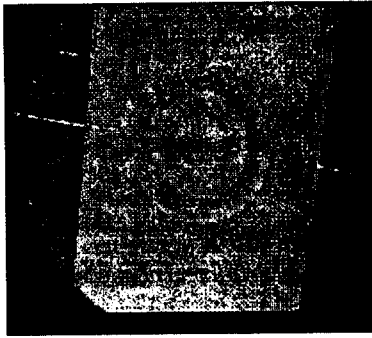
Fig 2. Experimental setup

CCD 카메라는 할로젠 램프와 Grating에서 같은 거리에 위치시켰다. Grating은 8line/mm를 사용하였고, 동전은 0.1 $\mu$ m 단위로 움직일수 있는 Motion Controller위에 마운트시켜 정밀한 이동을 할 수 있게 하였다. CCD 카메라에서 받은 4개의 상은 Frame grabber를 통해 PC에서 처리될 수 있게 하였다. Grating에서 CCD카메라까지의 거리는 400mm, CCD 카메라에서 광원까지의 거리는 200mm로 하였고, 측정기준으로 삼은 무아레 무늬는 Grating에서 1.5mm 떨어진 6차의 무늬로 측정 하였다.

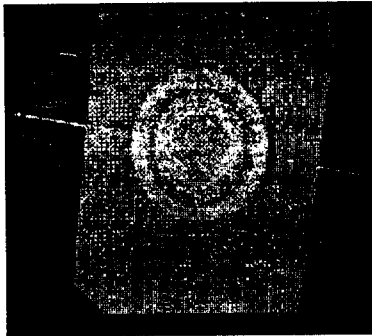
Fig. 3은 Four-Frame 위상이동법을 이용하여 계단형 시편을 측정한 모습을 보여주고 있다. 시편의 깊이가 0.1mm단위로 파여있기 때문에 기존의 일반적인 그림자 무아레 방법으로는 측정할 수가 없다.



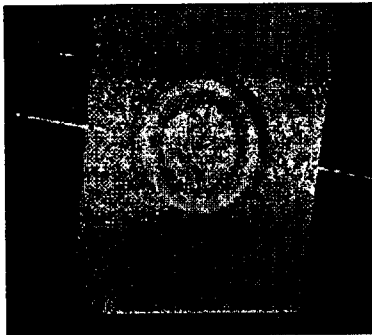
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig 3. Four moiré images with shifted phases :

- (a) shift  $\phi=0$  (b)  $\phi=\pi/2$
- (c) shift  $\phi=\pi$  (d)  $\phi=3\pi/2$

Fig. 4는 위상이동을 실행하여 얻어진 Phase map을 나타내고 있다.

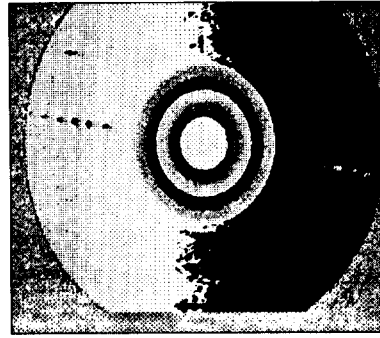


Fig. 4. Phase map

Fig. 5는 Fig. 4의 Phase map을 Demodulation 과정을 거쳐 실제 위상을 구한 image이다.

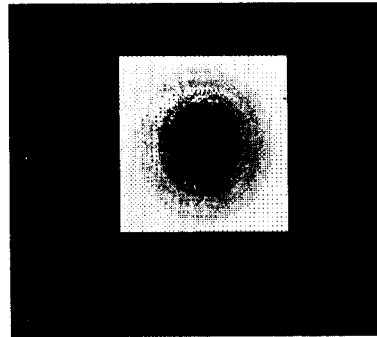


Fig. 5 Demodulation Image

Fig. 6에서는 Demodulation Image를 3차원의 형태로 나타내주고 있다.

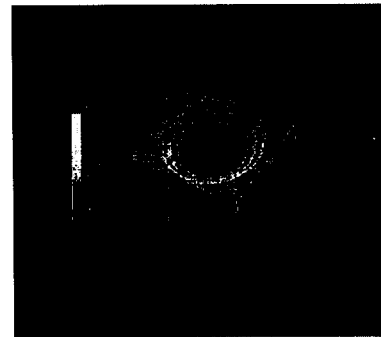


Fig. 6. 3D plot of a specimen

위 결과에 따르면 기존의 그림자 무아레가 측정하지 못하였던 정밀한 3차원 형상이 phase shifting 방법에 의해  $\mu\text{m}$ 단위로 측정될수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 7과 8은 위의 방법을 적용한 동전의 형상측정 결과를 보여주고 있다.

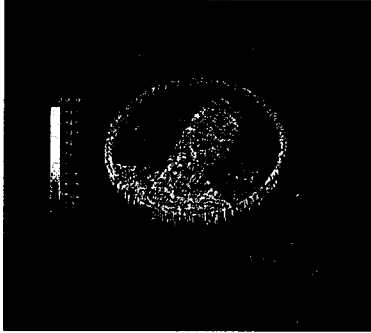


Fig. 7. 3D plot of a coin

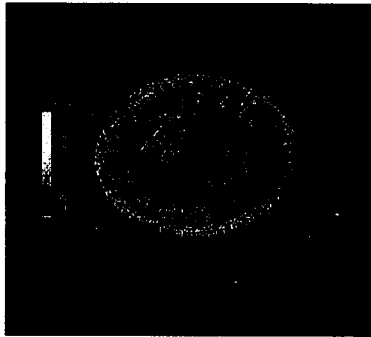


Fig. 8. 3D plot of a coin

## 6. 결 론

물체의 3차원 형상을 측정하기에 적합한 무아레 방법의 결점인 낮은 분해능을 향상시키기 위해 위상 이동방법을 도입하였다. Grating과 물체와의 거리가 Grating과 관찰자의 거리보다 현저히 작을 때, 무아레 무늬의 차수에 관계없이 일정한 위상이동을 실현할 수 있었다. 이 방법에서는 Four-Frame 위상이동 방법을 이용하여 기존의 그림자 무아레가 mm단위로 측정할수 있던 것을  $\mu\text{m}$ 단위로도 측정 할 수 있었다. 또한 복잡한 광학적 시스템을 도입할 필요가 없이 간단한 Computer-image processing 장비만 있어도 쉽게 실현 가능한 방법이라 하겠다.

## 참고문헌

- (1) G. Mauvoisin, F. Brémand, and A. Lagarde, "Three-dimensional shape reconstruction by phase-shifting shadow moiré", Applied Optics, Vol. 33, No. 11, pp. 2163-2169, 1994.
- (2) G. Mauvoisin, F. Brémand, and A. Lagarde, "Shadow moiré by phase shifting method and applications", SPIE, Vol. 2065, pp. 170-181, 1994
- (3) T. Yoshizawa and T. Tomisawa, "Shadow moiré topography by means of the phase-shift method", Opt. Eng. 32, pp. 1668-1674, 1993
- (4) K. Creath, "Phase-measurement interferometry : BEWARE these errors", SPIE, Vol. 1553, pp. 213-220, 1991.