

고단차 불연속 형상의 3차원 측정을 위한 이중파장 위상천이 영사식 무아레

김승우*·오정택**·정문식**·최이배**
(1998년 10월 9일 접수)

Two-Wavelength Phase-Shifting Projection Moiré Topography for Measurement of Three-Dimensional Profiles with High Step Discontinuities

Seung-Woo Kim, Jung-Taek Oh, Moon-Sik Jung and Yi-Bae Choi

Key Words : Projection Moiré topography(영사식무아레), Two-Frequency Interferometry(이중파장간섭계), Phase-Shifting Fringe Analysis(위상천이 간섭무늬해석), Three-Dimensional Profile Measurement(3차원 형상측정), Reverse Engineering(역공학).

Abstract

Moiré technique is now being extensively investigated as a fast non-contact means of three-dimensional profile measurement especially for reverse engineering. One problem with moiré technique is so called 2π -ambiguity problem that limits the maximum step height difference between two neighboring sampling points to be less than half the equivalent wavelength of moiré fringes. In this investigation, a new two-wavelength scheme of projection moiré topography is proposed and tested to cope with the 2π -ambiguity problem. Experimental results are discussed to assess the new method in measuring large objects with high step discontinuities.

1. 서론

최근에 들어 3차원형상측정기술들은 공학분야에만 국한되지 않고, 의학, 오락산업, 의복산업 등 그 응용범위를 확장하고 있다. 이러한 여러 분야의 요구를 만족시킬 수 있는 3차원형상측정기술로 과거에는 3차원좌표측정기(CMM: Coordinate Measuring Machine)를 이용한 접촉식 측정법이 있었으나, 최근에는 광학이론을 바탕으로 하는 비접촉 3차원측정법에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 대표적인 비접촉 측정법의 하나인 무아레현상을 이용한 3차원측정법은 1970년 Meadows 등과 Takasaki⁽²⁾에 의해 그림자식 무아레법이 처음 제안되었다. 이후, Yoshino 등⁽³⁾은 측정영역을 확대할 수 있는 영사식무아레법을 제안하여, 그림자식 무

아레법의 단점이었던 측정에 사용되는 격자의 크기가 측정대상물보다 커야하는 제한점과, 격자와 측정물 사이의 거리 제한 문제를 해결했다. 또한 Kujawinska⁽⁴⁾는 3차원 형상정보를 포함하는 무아레무늬 해석법으로 광간섭무늬해석에 사용되는 위상천이법⁽⁵⁾을 적용함으로써, 측정분해능이 괄목할 만하게 향상되었고, 무아레무늬 형태에 영향을 받지 않는 측정이 가능하게 되었다.

그러나 위상천이법을 적용하면 위상천이법의 근원적인 단점인 2π 모호성⁽⁶⁾ (2π -ambiguity)의 문제가 발생한다. 이는 측정대상물상의 연속한 두 점이 일정한 값 이상의 단차를 가지면, 정확한 측정할 수 없다는 것을 의미한다. 이러한 위상측정법의 2π 모호성의 문제를 해결하기 위해, 위상천이 간섭계(PSI:phase-shifting interferometry) 분야에서 Creath 및 Cheng 등^(6,7)이 다파장을 이용하는 방법을 최초로 제안하였다. 무아레를 이용한 3차원측정에 다파장 방법을 적용하기 위한 연구는 Matsumoto 등⁽⁸⁾에 의해 최초로 시도되어, 레이저를

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 대학원 기계공학과

광원으로 하는 덧셈식 무아레법에서 다과장을 이용한 측정을 수행하였다. Li⁽⁹⁾ 등은 무아레법 이외에 3차원형상을 추출하는 위상계측(PMP: phase-measuring profilometry)분야에서 다과장법을 적용하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 다과장법의 하나인 이중과장방법을 영사식무아레기술에 도입하기 위해 새로운 측정방법을 제안하고자 한다. 세부적으로는 위상천이법을 적용한 영사식무아레법의 넓은 측정영역과 높은 측정분해능을 그대로 유지하면서, 2π오호성을 제거하여 측정대상물 불연속 단차에 구애받지 않는 측정법을 개발하는데 목적을 두었다. 이를 위해 Creath 및 Cheng 등^(6,7)이 고안한 이중과장간섭계의 원리를 무아레법에 적용한 이중과장 위상천이영사식무아레법(Two-frequency projection moiré topography)에 대한 새로운 측정기술을 제시한다. 또한, 무아레법에서 이중과장구현을 위해 사용되는 격자쌍들에 김승우 등⁽¹⁰⁾이 고안한 위상천이격자원리를 적용하여 위상천이오차를 근원적으로 제거할 수 있는 격자제작법을 소개한다. 그리고 최종적으로 제안한 측정원리를 사용한 측정시스템을 설계, 제작하여 다양한 측정대상물에 대해서 측정을 수행함으로써 본 연구의 타당성을 검증하였고, 영사식무아레법을 적용한 측정에서 발생하는 높이와 측정위상간의 비선형성등 각종 측정오차를 제거하고 측정정도 향상을 위해 새로이 제안된 다평면 3차원보정법(N-plane 3D calibration)을 적용하여 이중과장위상천이 무아레법으로 획득할 수 있는 측정정도를 확인한다.

2. 위상천이 영사식무아레

Fig. 1은 영사식무아레 구현을 위한 기본적인 광학계 구성을 보여주고 있다. 영사식무아레 광학계는 크게 영사격자의 투영을 위한 영사계(projection system)과 물체 위에 투영된 격자상의 결상을 위한 결상계(viewing system)로 나누어 진다. 영사계에서는 백색광 광원의 빛을 집광렌즈(condenser)를 통해 영사격자(projection grating)에 조명한다. 그리고, 영사격자의 격자무늬를 영사렌즈(projection lens)를 통하여 측정하고자 하는 물체 위에 결상한다. 이때, 영사격자의 여백과 격자선이 1:1인 론키롤링(Ronchi-ruling)형태⁽¹⁾의 격자가 사용된다. 물체 위에 결상된 직선격자의 상은 측정물의 3차원 형상에 따라 변형되며, 이 변형된 격자상은 다시 결상계의 결상렌즈(viewing lens)에 의

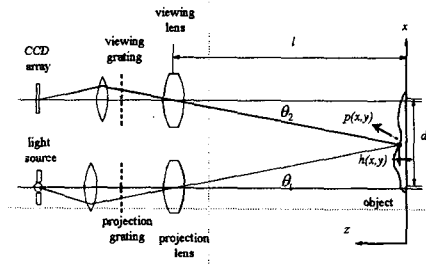


Fig. 1 Optical configuration of projection moiré.

해 영사격자와 동일한 형태를 가지는 기준격자(reference grating)위에 결상된다. 이때 기준격자와 변형된 격자가 겹치게 되어 무아레무늬가 형성되고, 이 무아레무늬는 릴레이렌즈(relay lens)와 CCD에 의해 광강도(intensity)에 비례하는 전기적 신호로 획득된다.

$$I_p(x, y) = B(x, y) \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{MG} \left(h(x, y)(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \right) + \frac{2\pi\delta}{G} \right] \right\} \quad (1)$$

여기서 $B(x, y)$ 는 P 점에서의 무아레무늬 평균광강도, $h(x, y)$ 는 측정점 P 의 높이, M 은 영사렌즈와 결상렌즈의 배율, G 는 영사격자와 기준격자의 피치, θ_1 는 P 에서의 영사각도, θ_2 는 P 에서의 결상각도, δ 는 영사격자와 기준격자사이의 상대변위를 나타낸다. 3차원 형상정보를 포함하는 무아레무늬의 해석방법으로 PSI의 위상천이법을 적용하기 위해서는 무아레무늬가 아래와 같은 형태의 주기적인 분포를 가져야 한다.⁽⁵⁾

$$I(x, y) = A(x, y) [1 + v(x, y) \cos(\Phi(x, y) + \Delta)] \quad (2)$$

여기서 $A(x, y)$ 는 평균광강도, $v(x, y)$ 는 간섭무늬의 정규화된 가시도, Δ 는 위상천이량, 그리고 $\Phi(x, y)$ 는 추출하고자 하는 초기위상값을 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)를 비교하면 아래와 같은 관계를 유출할 수 있게 된다.

$$h(x, y) = \frac{\lambda_{eq}}{2\pi} \Phi(x, y), \text{ where } \lambda_{eq} \equiv \frac{MG}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (3)$$

위식에서 $\tan \theta_1 - \tan \theta_2$, 그리고 영사렌즈와 결상렌즈의 배율 M 은 각각 Fig. 1의 기하학적인 관계

와 기하광학의 기본식에 의해 다시 아래와 같이 높이 $h(x,y)$ 의 값들로 표현할 수 있다.

$$\tan \theta_1 - \tan \theta_2 = \frac{d}{L-h(x,y)}, \quad M = \frac{L-f-h(x,y)}{f} \quad (4)$$

여기서 L 은 동작거리(working distance), d 는 두 광축간의 거리를 나타내고, f 는 영사렌즈와 결상렌즈의 초점거리이다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 등가파장 λ_{eq} 를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\lambda_{eq} = \frac{L^2 G}{fd} \left[1 - \left(\frac{h}{L} \right)^2 - \frac{f}{L} \left(1 - \frac{f}{L} \right) \right] \quad (5)$$

위식을 살펴보면, 등가파장 λ_{eq} 는 일정한 상수가 아니고 측정물의 높이 h 에 따라 비선형적으로 변화함을 알 수 있다. 그러나, 동작거리 L 에 비교하여 측정물의 높이 h 가 상대적으로 매우 작을 경우에는 $h(x,y)/L \ll 1$ 이므로, 등가파장 λ_{eq} 를 아래와 같이 상수로 근사할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\lambda_{eq} \approx \frac{L^2 G}{fd} \left(1 - \frac{f}{L} \right) \quad (6)$$

영사식무아레에서 위상천이법(phase-shifting technique)의 적용은 영사격자와 기준격자사이의 상대변위를 인위적으로 인가함으로써 가능하다. 일반적으로 사용되는 4-bucket 알고리즘⁽⁵⁾을 사용할 경우, 두 격자사이의 상대변위를 위상으로 나타낸 값 $2\pi\delta/G = \Delta$ 가 순차적으로 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 가 되도록 상대이송을 하고, 각각에 위상이송에 대해 무아레무늬 광강도 $I_1(x,y), I_2(x,y), I_3(x,y), I_4(x,y)$ 를 획득한다. 그리고 각 측정점에서 다음의 식을 이용해서 추출하고자하는 초기위상의 주 위상값 $\Phi_p(x,y)$ 를 구할 수 있다.⁽¹⁰⁾

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

구하여진 초기위상의 주 위상값 $\Phi_p(x,y)$ 으로부터 식 (3)을 이용하여 측정점에서의 높이 $h(x,y)$ 를 구할 수 있다. 그러나 여기서 한가지 주의가 요구된다. 이는 식 (7)로 구해지는 초기 위상값은 \tan^{-1} 의 연산의 특성으로 인해 $-\pi$ 와 $+\pi$ 사이의 위상값만을 가진다. 이를 다르게 표현하면, 측정물의 단차가 $\lambda_{eq}/2$ 이상인 경우에도 측정되는 단차는 $\lambda_{eq}/2$ 보다 작게 측정된다. 이를 위상천이기법의 2π 모

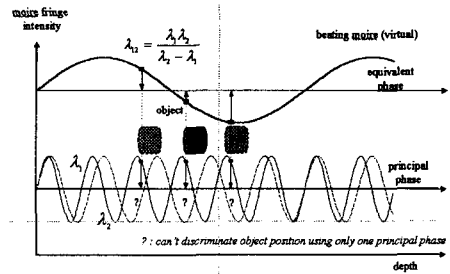


Fig. 2 Basic concept of two-wavelength moiré.

호성(2π ambiguity)문제라 한다. 무아레 현상을 이용한 측정에서 위상천이기법의 도입은 위상값 연산에 많은 장점을 도입한다. 예로 반사율이 위치에 따라 변화하는 표면이나 불연속면을 갖는 표면의 경우에도 측정을 할 수 있다. 반면 위상천이기법의 도입은 2π 모호성 문제를 가져오며, 이로 인해 단차가 큰 물체의 측정이 어려워지는 단점을 갖게 된다. 또한, 식 (3), 식 (6)에서 나타난 무아레 무늬 위상과 높이 값과의 비선형적인 관계를 보정하기 위해서는 측정점의 무아레 무늬의 절대 위상값을 알아야 하나, 위상천이 기법만으로는 주 위상값만을 추출하는 문제가 있다. 그러므로, 무아레 측정에서 효율적인 위상천이기법을 도입하고, 정밀한 측정을 위해 보정을 수행하기 위해서는 2π 모호성 문제에 대한 근원적인 해결이 필요하다.

3. 이중파장 간섭원리의 적용

앞에서 언급한 2π 모호성의 문제를 다르게 표현하면 무아레 무늬의 차수(order)를 추출하지 못하는 못하기 때문에 일어나는 문제라 할 수 있다. 여기에 이중파장(two-wavelength)을 이용한 광위상 간섭계의 원리^(6,7)를 적용할 경우, 무아레무늬의 차수 추출이 가능해져 2π 모호성을 해결할 수 있다. Fig. 2는 이중파장간섭계의 기본원리를 도식적으로 나타낸다. 이중파장 광위상간섭계의 원리는 비슷한 값을 가지는 두 파장을 사용하여, 두 파의 맥놀이 현상을 일으켜 원래의 파장에 비해 길어진 파장을 얻어내는 것으로, 긴 파장을 사용하여 2π 모호성으로 인한 측정의 한계를 제거할 수 있다. 이 원리를 무아레법에 적용할 경우, 맥놀이로 만들어진 긴 파장을 이용하여 무아레무늬의 차수를 산출할 수 있게 된다.

무아레법에 이중파장 원리를 적용하기 위해서는 광위상간섭계와 동일하게 두개의 등가파장이 필요하다. 무아레무늬의 등가파장은 식 (3)과 같이

격자의 피치와 비례하므로, G_1 , G_2 의 피치를 가지는 두 격자를 이용하여, 각각에 대해 무아래무늬를 획득할 경우, 이중파장의 원리를 직접 적용할 수 있다. G_1 , G_2 피치의 격자를 사용해 얻어진 무아래무늬로부터 맥놀이효과를 얻는 방법은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\Phi_{12} &= \Phi_1(x, y) - \Phi_2(x, y) = \frac{2\pi h(x, y)}{\lambda_{eq,1}(h)} - \frac{2\pi h(x, y)}{\lambda_{eq,2}(h)} \\ &= \frac{2\pi h(x, y)}{\lambda_{eq,12}(h)} \quad (8) \\ \text{where } \lambda_{eq,12}(h) &= \frac{\lambda_{eq,1}(h)\lambda_{eq,2}(h)}{\lambda_{eq,2}(h) - \lambda_{eq,1}(h)}\end{aligned}$$

위 식에서 $\Phi_1(x, y)$, $\lambda_{eq,1}(h)$, $\Phi_2(x, y)$, $\lambda_{eq,2}(h)$ 는 G_1 , G_2 피치의 격자에 의해 형성되는 각각의 무아래무늬의 위상과 등가파장을 나타낸다. 이와 더불어 $\lambda_{eq,12}(h)$, $\Phi_{12}(x, y)$ 는 맥놀이 된 등가파장과 이를 기준으로 표현된 위상이다. 식 (8)에서와 같이 $\lambda_{eq,1}(h)$ 과 $\lambda_{eq,2}(h)$ 의 비를 즉 G_1 , G_2 의 비를 조절함으로써, 즉 매우 큰 등가파장을 사용한 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다.

측정점의 높이 $h(x, y)$ 를 두 가지 등가파장 $\lambda_{eq,1}(h)$, $\lambda_{eq,12}(h)$ 을 기준으로 표현된 각각의 위상값 $\Phi_1(x, y)$, $\Phi_{12}(x, y)$ 으로 표현하면, 짧은 등가파장을 기준으로 한 무아래무늬 위상 $\Phi_1(x, y)$ 의 차수를 추출할 수 있다.

$$\begin{aligned}h(x, y) &= \frac{\Phi_{12}(x, y)}{2\pi} \lambda_{eq,12}(h) \\ &= \frac{\Phi_1(x, y)}{2\pi} \lambda_{eq,1}(h) = \frac{\Phi_{1p}(x, y) + 2m\pi}{2\pi} \lambda_{eq,1}(h) \quad (9)\end{aligned}$$

where $\Phi_1(x, y) = \Phi_{1p}(x, y) + 2\pi m$, m is interger

여기서 $\Phi_{1p}(x, y)$ 는 위상정렬 과정을 거치지 않은 위상천이 기법에 의해 획득된 주위상값이며, m 은 무아래무늬의 차수를 나타낸다. 식 (9)와 식 (3), (5), (8) 로 부터 무아래무늬 차수 m 을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}m &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\lambda_{eq,12}(h)}{\lambda_{eq,1}(h)} \Phi_{12}(x, y) - \Phi_{1p}(x, y) \right] \\ &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{G_2}{G_2 - G_1} \Phi_{12}(x, y) - \Phi_{1p}(x, y) \right] \quad (10)\end{aligned}$$

위 식에서 차수 m 은 이론적으로 정수이다. 그러나, 위상천이 기법으로 계산되는 무아래무늬 위상값에는 여러 오차성분들이 포함되어 있어 차수 m 이 정확한 정수값을 가질 수 없게 된다. 따라서 정수화(integer)연산과정을 통해 그 값을 정하게 된다. 결정된 차수를 식 (9)에 대입하면 측정점의 높이 $h(x, y)$ 를 구할 수 있다. 따라서, 위상천이 기법에서 얻은 높은 측정분해능은 그대로 유지하면서 2π 모호성 문제를 극복할 수 있게 된다.

이중파장 간섭원리를 이용해 차수를 추출하면, 위와 같은 장점을 가질 수 있는 반면에 위상추출 오차에 매우 민감해지는 단점도 가지고 있다.⁽⁶⁾ 이는 위상추출 오차가 정해진 한계를 초과할 경우에 차수추출이 실패하게 되는 문제이며, 차수계산 과정에 도입되는 오차 증폭 작용에 의해 발생한다. 아래 식은 오차 증폭 작용은 측정위상을 측정대상에 자체에 의한 신호 (signal) 항과 오차에 의한 오차항으로 나누어 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Phi_{1p,Real} &= \Phi_{1p,Signal} + \Phi_{1p,Error} \\ \Phi_{2p,real} &= \Phi_{2p,Signal} + \Phi_{2p,Error} \quad (11) \\ m_{Real} &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{G_2}{G_2 - G_1} \left(\Phi_{1p,Signal} + \Phi_{1p,Error} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\Phi_{2p,Signal} + \Phi_{2p,Error} \right) \right]\end{aligned}$$

식 (11)에서 각 항에 밀침자 *Signal*은 오차가 포함되지 않는 신호항을 *Error*는 오차항을 나타낸다. 계산된 차수를 다시 신호항과 오차항으로 분리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}m_{Real} &= m_{Signal} + m_{Error} \\ \text{where} \\ m_{Signal} &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{G_2}{G_2 - G_1} \left(\Phi_{1p,Signal} - \Phi_{2p,Signal} \right) \right. \\ &\quad \left. - \Phi_{1p,Signal} \right] \quad (12) \\ m_{Error} &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{G_2}{G_2 - G_1} \left(\Phi_{1p,Error} - \Phi_{2p,Error} \right) \right. \\ &\quad \left. - \Phi_{1p,Error} \right]\end{aligned}$$

여기서 차수추출오차값 m_{Error} 에서 위상값이 가지는 오차에 $G_2/(G_2 - G_1)$ 이 곱해짐을 알 수 있다. 이러한 오차증폭에 의해 m_{Error} 가 ± 0.5 를 초과할 경우 차수추출을 할 수 없게 된다. 그러므로, 차수추출이 완전하게 이루어지기 위해서는 무아래무늬 획득에 있어 최대한 오차요인을 제거해 위상오차 수준이 최소화 되도록 해야 한다. 이와 아울러 표

면성질 등에 의해 오차가 어쩔 수 없이 발생할 경우에 이를 제거하기 위한 데이터처리가 필요하다.

4. 차수추출오차 제거

본 연구에서는 이중과장간섭법에서 발생하는 차수추출 오차를 제거하기 위해, 무아레 무늬 위상 $\Phi_2(x,y)$ 의 차수 n 을 추가적으로 사용하는 방법을 고안하였다. 이중과장간섭법에서 이상적인 두 개의 무아레 무늬차수 m 과 n 이 가지는 관계를 규정하고 이를 적용함으로써, 오차에 강인한 차수추출을 이룰 수 있다.

오차가 포함되지 않은 이상적인 경우에 두 개의 무아레 무늬차수 m 과 n 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{if } \lambda_{eq,1} < \lambda_{eq,2} \text{ then } |\Phi_1(x,y)| > |\Phi_2(x,y)| \quad (a) \\ & \text{if } (a) \text{ and } h(x,y) < \lambda_{eq,12} \text{ then } |m-n| = 0, +1 \quad (b) \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)의 조건이 만족되는 경우, 이상적인 두 차수차의 절대값 $|m-n|$ 은 0,+1 값만을 가진다.^(7,8) 위 조건하에서 임의의 i 번째 측정점에서의 두 절대차수의 차이값 $m_i - n_i$ 과 이와 인접한 $i+1$ 번째 측정점에서의 $m_{i+1} - n_{i+1}$ 값 사이에 관계는 아래와 같이 정해지게 된다.

$$\begin{cases} m_{i+1} - n_{i+1} = \pm 1, & m_i - n_i = 0 \\ m_{i+1} - n_{i+1} = \pm 1, & m_i - n_i = \mp 1 \end{cases} \rightarrow \Delta m = m_{i+1} - m_i \neq 0 \quad (14)$$

이는 무아레무늬 위상 $\Phi_1(x,y)$ 이 $\Phi_2(x,y)$ 보다 항상 빠르게 변하기 때문에 발생하는 현상이며, Fig. 3은 식 (14)를 설명하는 그림이다.

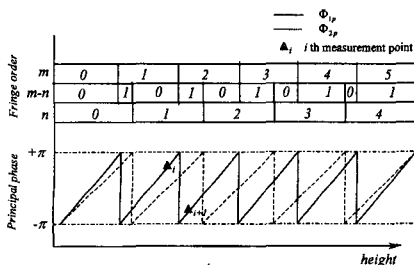


Fig. 3 Moiré fringe order map & difference of fringe order between Φ_1 and Φ_2

실제적으로 오차가 존재하는 경우에도 위 식을 그대로 적용할 수 있다. 오차가 포함된 차수 m_{Real} , n_{Real} 를 식 (10), (12)와 같은 방법으로 오차항과 신호항으로 분리하고 정리하면, 두 차수의 차 $m_{Real} - n_{Real}$ 는 오차에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} m_{Real} - n_{Real} &= m_{Signal} - n_{Signal} + (m_{Error} - n_{Error}) \\ &= m_{Signal} - n_{Signal} \\ \therefore m_{Error} - n_{Error} &= \frac{1}{2\pi} \left[\begin{aligned} & \frac{G_2}{G_2 - G_1} (\Phi_{1p,Error} - \Phi_{2p,Error}) \\ & - \Phi_{1p,Error} + \Phi_{2p,Error} \\ & - \frac{G_1}{G_2 - G_1} (\Phi_{1p,Error} - \Phi_{2p,Error}) \end{aligned} \right] = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

식 (14), (15)를 이용하면 두 인접한 측정점 사이의 무아레무늬 차수 m 의 변화를 오차에 강인하게 찾아낼 수 있다. 즉, 두 인접 측정점 사이에 두 절대차수의 차이값 $m_i - n_i$ 이 식 (14)를 만족할 경우, 무아레무늬 차수 m 은 반드시 바뀌게 된다. 그러나, 식 (14)는 차수변화의 충분조건만을 지정하였으므로, 차수가 변하는 모든 측정점을 찾기 위해 또 다른 조건이 필요하다. 두 인접 측정점 사이에 단차로 인해 차수 m 이 증가 또는 감소하면서, 두 절대차수의 차이값 $m_i - n_i$ 의 변화를 유발하지 않는 경우는 각 차수의 차 $\Delta m = m_{i+1} - m_i$ 과 $\Delta n = n_{i+1} - n_i$ 이 같은 값을 가지며 동시에 1 이상 증가 또는 감소한 경우에만 가능하다. 위 조건을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{cases} (m_{i+1} - n_{i+1}) - (m_i - n_i) = 0 \\ |\Delta m|^2 + |\Delta n|^2 \geq 2 \end{cases} \rightarrow \Delta m = m_{i+1} - m_i \neq 0 \quad (16)$$

식 (14)와 식 (16)은 차수가 변하는 모든 조건을 기술한 것으로서, 이를 적용하여 오차에 강인하게 무아레무늬 차수가 동일한 영역 즉, 등차영역 (equi-order area)을 구할 수 있다. 하나의 등차영역에 해당하는 대표 차수의 결정은 영역내의 모든 무아레무늬 차수 m 의 평균을 계산하고 정수화 연산을 거쳐 정해진다. 위와 같은 등차영역과 대표 차수의 추출을 통해, 일반적인 차수계산과정에서 도입되는 오차 증폭 작용을 효과적으로 감쇄시킬 수 있다.

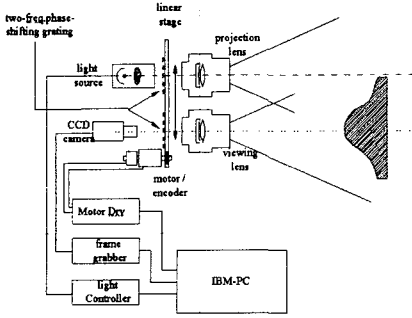


Fig. 4 Schematic diagram of two-freq. phase-shifting projection moiré measurement system.

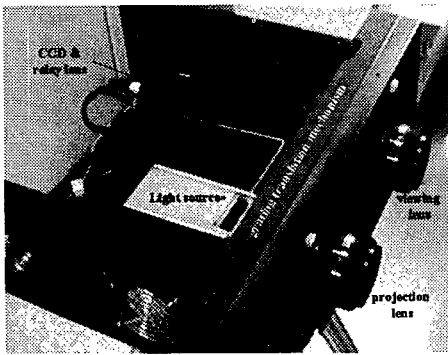


Fig. 5 Photograph of experimental setup for two-freq. phase-shifting projection moiré topography.

5. 이중파장 위상천이 영사식법 구현

Fig. 4는 본 연구에서 지금까지 기술된 내용을 중심으로 설계된 측정시스템의 구성도를, Fig.5는 실제 제작된 측정기의 내부를 보여주는 사진이다. 기본적으로는 동 저자들이 지난번 발표한 위상천이 영사식무아레를 이용한 측정시스템⁽¹⁰⁾과 동일한 구성을 가지나, 기존의 위상천이격자를 이중주파수 위상천이격자로 대체한 점에서 차이가 있다.

Fig. 6은 이중주파수 위상천이격자의 구성을 보여준다. 이중주파수 위상천이격자 설명에 앞서 하나의 주파수를 가지는 위상천이격자를 먼저 살펴본다. 위상천이격자는 기준격자와 영사격자를 한 쌍으로 해서 전체 n 개의 쌍이 기본 구성을 이룬다. n 은 위상천이의 회수로 본 연구에서는 $n=4$ 이다. 각 쌍에서 기준격자와 영사격자사이의 상대거리는 $d+\delta_i$ 로 결정되며, 여기서 i 는 격자쌍의 번호이고

$$\delta_i = \frac{G}{(n-1)}(i-1) \text{이다. 전체의 격자 쌍들은 크롬}$$

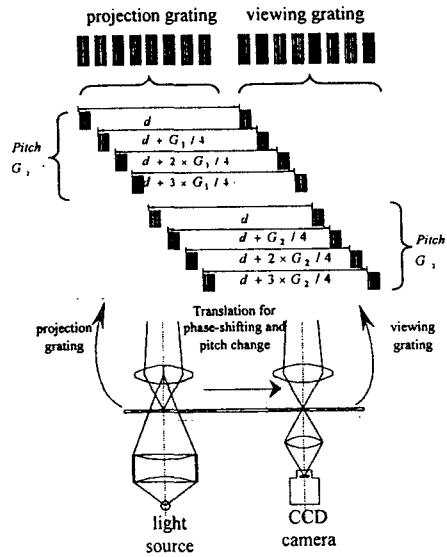


Fig. 6 Optical configuration of two-freq. phase-shifting projection moiré and two-freq. phase-shifting grating.

(chrome)이 코팅 되어 있는 하나의 수정유리(quartz glass)위에 전자빔 리소그래피공법에 의해 제작되었다. 전자빔 가공은 10 나노미터의 수준의 가공정밀도를 제공하며 이로 인해 각 쌍마다 영사격자와 기준격자 사이의 상대거리를 정확히 조절 가능하게 한다. 이렇게 하나의 수정유리판 위에 모든 격자를 가공하면 무아레무늬 획득시 시적분 간섭무늬 획득법⁽¹⁰⁾과 위상천이를 동시에 구현할 수 있는 장점을 얻을 수 있다.

이중주파수 위상천이 격자는 두 가지 피치 G_1, G_2 에 대한 4쌍의 위상천이 격자를 나란히 배열한 구조를 가진다. 측정기 내부에 시적분 간섭무늬 획득을 위한 직선 스테이지(linear stage)가 있어, 위와 같은 격자의 배열을 스테이지 위에 장착할 경우, 무아레무늬 형성을 위한 격자의 피치를 스테이지 직선운동만으로 바꾸어 줄 수 있다. 이는 이중파장 구현을 위해 격자를 교체하는 작업과 이로 인해 발생할 수 있는 측정환경의 변화를 제거하고, 무아레무늬에 영향을 주는 모든 변수 중 오직 격자의 피치값만을 바꾸어 줄 수 있게 한다. 또한, 위상천이격자의 제작방법을 사용하여 앞서 설명한 위상천이격자의 장점을 이중파장에서 그대로 적용할 수 있다. Table 1에는 실제 제작된 이중주파수 위상천이격자의 주요 설계 변수값을 수록하였다.

Table 1 Grating design values.

Design value	$L(m)$	$d(mm)$	$f(mm)$	$G_1(mm)$	$G_2(mm)$
Design variable	2	150	60	0.074	0.080

6. 시스템 보정

영사식 무아레법 이론에서 등가과장 λ_{eq} 가 상수로 존재할 수 없다. 또한, 등가과장이 여러 기하학적 변수에 의해 결정되므로 설계치만으로 정확한 등가과장을 결정할 수 없게 된다. 이와 아울러 영사식 무아레법에서 두 광축이 완전히 수평하지 않는 경우와 렌즈의 수차 등으로 인해 등위상면이 광축과 수직한 평면을 이루지 못하고 자유곡면형태로 휘어지게 된다.^(11,12) 그러므로, 무아레무늬 위상과 측정높이의 관계, 등위상면의 휘어짐을 미리 보정해야만 측정의 정도를 높일 수 있게 된다. 본 연구에서는 이를 위해 다평면 3차원보정법(N-plane 3D calibration)을 제안하여 보정을 수행하였다. 다평면 3차원보정법을 도식적으로 표현한 Fig.7에서 보듯이, 본 보정법은 크게 네 가지 과정을 거쳐 수행하게 된다.

Step. 1 광축 방향으로 이송하는 정밀구동 스테이지 위에 광축에 수직한 보정평면(calibration target)을 설치하여, 광축 방향으로 N 등분하여 구동한다. 보정평면의 위치는 레이저인터페로미터(laser interferometer)를 이용해 검출한다. $k(=1..N)$ 번째 보정판 위치($x_3=h_{laser,k}$)에서 측정을 수행하여 $i(=1..w)$, $j(=1..h)$ 번째 보정점의 공간좌표 $\bar{X}_{ij,k}^C$ 에 해당하는 픽셀위치 $\bar{Y}_{ij,k}^C$, 무아레무늬 위상 $\Phi_{ij,k}^C$ 를 구한다. 이때 공간좌표는 $\bar{X}=(x_1, x_2, x_3)^T$ 로 픽셀좌표는 $\bar{Y}=(y_1, y_2)^T$ 로 정의한다.

Step. 2 $k=1$ 부터 N 까지의 각 보정평면 위치에서 $\bar{X}_{ij,k}^C$, $\bar{Y}_{ij,k}^C$ 를 이용해, 픽셀좌표를 k 번째 평면($x_3 = h_{laser,k}$)의 이차원 좌표로 맵핑하는 카메라보정행렬⁽¹³⁾ \bar{H}_k^C 을 계산한다.

$$\hat{X}_{ij,k} = \bar{H}_k^C \hat{Y}_{ij,k}, \bar{H}_k^C = \hat{X}_{ij,k} \hat{Y}_{ij,k}^T (\hat{Y}_{ij,k} \hat{Y}_{ij,k}^T)^{-1} \quad (17)$$

where

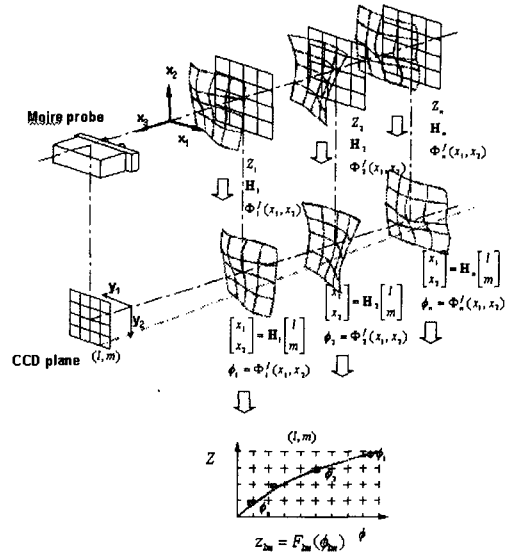


Fig. 7 Sequential diagram of N-plane 3D calibration method.

$$\hat{X}_{ij,k} = [x_{1,ij,k} \quad x_{2,ij,k} \quad 1]^T, \\ \hat{Y}_{ij,k} = [y_{1,ij,k} \quad y_{2,ij,k} \quad y_{1,ij,k}^2 \quad y_{2,ij,k}^2 \quad y_{1,ij,k} y_{2,ij,k} \quad 1]^T$$

그리고, $\bar{X}_{ij,k}^C$ 과 $\Phi_{ij,k}^C$ 를 이용해 k 번째 보정평면 위치($x_3 = h_{laser,k}$)에서의 평면좌표에 대한 위상을 매개함수곡면 $\Phi_k^f(x_1, x_2)$ 으로 모델링 한다. 본 연구에서는 퍼거슨곡면맞춤법(Ferguson surface method)⁽¹⁴⁾ 을 사용한다. step 2를 수행함으로써 N 개의 \bar{H}_k^C 와 $\Phi_{ij,k}^C$ 가 준비된다.

Step. 3 step.3 과정에서부터 CCD 상의 모든 측정점 $\bar{Y}_{lm} = (y_{1,lm}, y_{2,lm})^T$ 에 대한 각각 보정을 수행한다. 먼저, 카메라보정행렬 \bar{H}_k^C 을 이용하여, \bar{Y} 와 매칭이 되는 $k=1$ 부터 N 까지의 보정평면 위치에서의 공간 좌표 $\bar{X}_{lm,k}$ 을 구한다. 이후, step.2에서 산출한 $\Phi_k^f(x_1, x_2)$ 를 통해 각 보정평면상의 공간 좌표 $\bar{X}_{lm,k}$ 에 대한 위상값 $\Phi_{lm,k}$ 을 계산한다. 마지막으로 N 개의 보정평면 위치 $h_{laser,k}$ 와 이 위치에서 계산된 위상값 $\Phi_{lm,k}$ 으로부터 고차다항식끼리 맞춤을 수행하여 측정위상과 높이에 대한 상관관계 $h = F_{lm}(\Phi)$ 를 구하여, 고차다항식 계수를 저장한다.

$$\Phi_{lm,k} = \Phi_k^f(x_{1,lm,k}, x_{2,lm,k}) \quad (18a)$$

where

$$[x_{1,lm,k} \ x_{2,lm,k} \ 1]^T = \bar{H}_k^C [y_{1,lm} \ y_{2,lm} \ y_{1,lm}^2 \ y_{2,lm}^2 \ y_{1,lm}y_{2,lm} \ 1]^T$$

$$\text{Let } h = F_{lm}(\Phi) = \sum_{i=0}^p a_{lm,i} \Phi^i \quad (18b)$$

$$A_{il} = [a_{lm,0} \ a_{lm,1} \ \dots a_{lm,p}]^T$$

$$R_{lm} = [h_{laser,1} \ h_{laser,2} \ \dots h_{laser,N}]^T$$

$$P_{lm} = \begin{bmatrix} 1 & \Phi_{lm,1} & \dots & \Phi_{lm,1}^p \\ 1 & \Phi_{lm,2} & \dots & \Phi_{lm,2}^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \Phi_{lm,N} & \dots & \Phi_{lm,N}^p \end{bmatrix}$$

$$R_{lm} = P_{lm} A_{lm}, \quad A_{lm} = P_{lm}^T R_{lm} (P_{lm}^T P_{lm})^{-1}$$

Step. 4 실제 측정을 수행한 후, 각 픽셀 $\bar{Y}_{lm} = (y_{1,lm}, y_{2,lm})^T$ 에서 이중과장법으로 계산된 위상을 step 3에서 구한 각각의 픽셀에 대한 보정함수 $Z = F_{lm}(\Phi)$ 관계에 대입하여 보정된 높이값을 얻는다.

앞의 4가지 과정을 거침으로써 등가과장의 비선형성 제거, 등위상면의 휘어짐 보상 그리고 카메라 캘리브레이션을 하나의 보정과정을 통해 구현하게 된다. 그러나, 다평면 3차원보정법(N-plane 3D calibration)은 위와 같이 많은 측정오차를 동시에 풀 수 있는 반면, 보정을 위해 많은 보정점을 획득해야 하므로 시간이 많이 소요되는 단점을 가지고 있기도 하다.

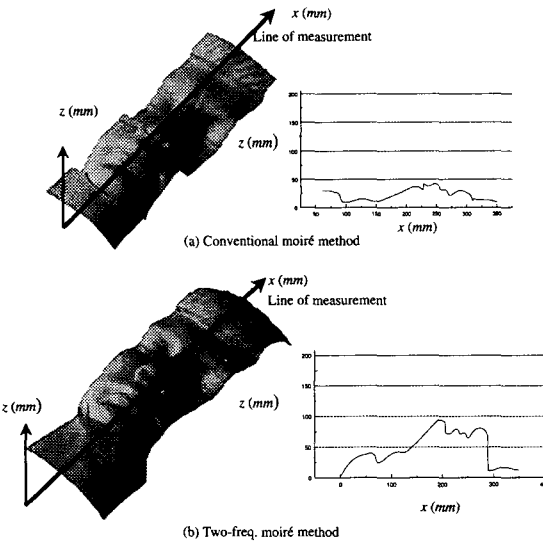
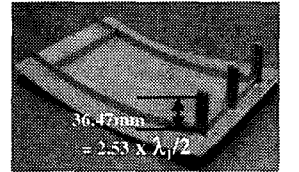


Fig. 8 Measurement example 1. Measurement target : Jupiter sculpture (Comparison of conventional method and two-freq. moiré method)

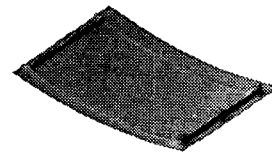
7. 실험결과 및 고찰

본 연구의 효용성을 확인하기 위해, 먼저 2π 모호성으로 인해 기존의 위상천이영사식법으로 측정이 실패하는 측정대상물에 이중과장영사식무아레법을 적용하여 측정하고, 결과를 비교하였다.

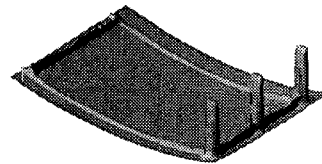
Fig. 8은 주피터 두상을 측정한 결과로, 기존의 위상천이영사식법으로 측정할 경우, 코와 턱부분의 급격한 단차로 인해, 2π 모호성이 발생하여 측정이 실패한 것을 알 수 있다. 이에 비해 이중과장영사식무아레법이 적용된 경우, 위의 문제시 된 부분이 측정됨을 알 수 있다. 그러나, 차수추출이 완전하게 이루어지지 않음을 볼 수 있다. 앞서 제시한 차수추출오차제거법이 많은 오차를 제거하였으나, 무아레무늬 가시도가 매우 낮은 부분에 대해서는 오차발생이 어쩔 수 없이 발생하게 됨을 확인할 수 있다. 또 다른 측정 결과로 Fig. 9에 있는 급격한 단차를 가지고 있는 플라스틱 사출물을 측정하였다. 위 두 결과에서 보듯이 급격한 단차를 이중과장영사식무아레법으로 측정할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Measurement target : Injection molded plastic part



(b) Conventional moiré method

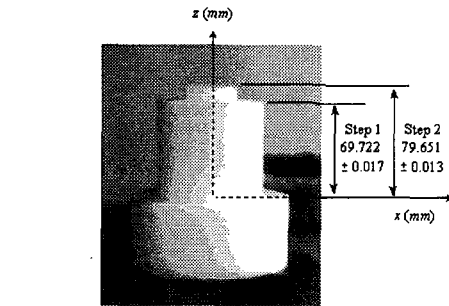


(c) Two-freq. moiré

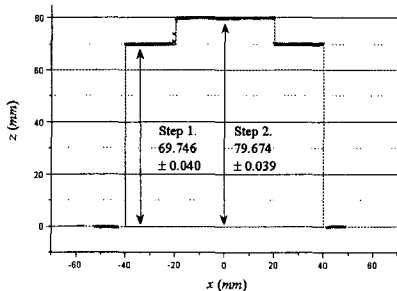
Fig. 9 Measurement example 2. Measurement target : Plastic part (Comparison of conventional method and two-freq. moiré method).

2π 모호성 제거를 위한 실험과 함께 측정결과가 가지는 측정 불확도 향상을 위해, 본 연구에서 제안되어진 다평면 3 차원보정법을 실험 하였다. 위상보정과 카메라 보정을 위해 63 개의 보정점이 존재하는 보정평면을 30mm 간격으로 이송하여, 총 크기 200mm x 150mm x 180mm 부피에 대해 보정을 수행하였고, 보정후 측정 불확도를 확인하기 위해 단차시편을 제작하여 공업계의 표준으로 사용되는 3 차원측정기(CMM)로 측정한 결과와 비교하여 보정결과를 확인하는 방법을 사용했다.

Fig. 10(a)는 제작된 단차시편의 사진이며, 10(b)는 CMM 과 이중과장위상천이 영사식무아레를 이용하여 측정한 결과를 비교한 그림으로, 단차 1의 단차 평균값의 경우 +0.024mm, 단차 2의 경우 +0.022mm의 차이를 가지고 있음을 확인하였다. Table 2 에서는 각각의 단차평균값과 평균값 산정을 위한 측정점의 개수가 표기되어 있다. Fig.11 은 본 측정방법을 이용하여 얻을 수 있는 반복능(Repeatability)을 산정한 실험의 결과이다. 동일한 측정점을 20 회 이상 반복 측정하여 획득된 측정값의 표준편차(σ)의 4 배를 기준으로 반복능을 산정할 경우, 반복능($4\sigma, \pm 2\sigma$)은 0.12mm 인 것을 확인할 수 있다.



(a) Step specimen for uncertainty evaluation and CMM step measurement result



(b) Overlapped graph of step measurements made by moiré and CMM. And moiré measurement results are shown in the middle of graph

Fig. 10 Uncertainty evaluation of two freq. phase-shifting projection moiré method.

Table 2 Comparison of step measurement results between moiré method and CMM.

Step number	Measurement method	Mean value (mm)	Standard deviation (mm)	Data number (N)
Step 1	Moiré	69.746	0.080	92
	CMM	69.722	0.017	20
Step 2	Moiré	79.763	0.074	95
	CMM	79.651	0.013	22

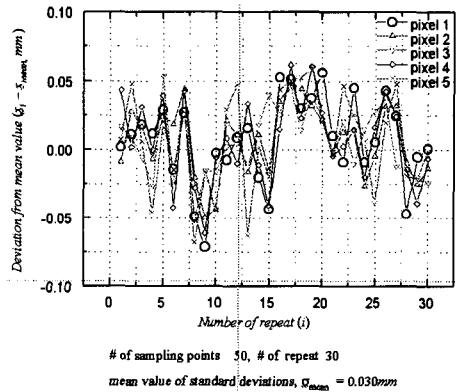


Fig. 11 Evaluation of repeatability from direct measurement.

위와 같은 실험을 통해, 본 연구에서 제안된 이중과장위상천이영사식무아레법을 이용하여 2π 모호성이 극복이 되면서, 측정깊이 대비 높은 분해능과 측정정도를 획득할 수 있음을 확인할 수 있다.

8. 결론

본 연구에서는 위상천이영사식무아레법의 넓은 측정영역과 높은 분해능이라는 장점을 유지하면서 기존의 방법으로 측정할 수 없는 고단차를 측정하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 이중과장방법을 적용하여 위상천이영사식무아레법이 가지는 2π 모호성 문제를 제거하는 새로운 측정원리를 제안하였으며, 실험을 통해 이를 증명하였다. 아울러, 제안된 측정원리 구현을 위해 위상천이격자의 원리를 적용한 이중과장격자를 고안하여, 기존의 위상천이영사식무아레법을 이용한 측정장비에 그대로 적용 가능하게 하였다. 그러나, 이중과장의 원

리를 그대로 적용할 경우에 오차증폭의 문제를 야기하게 되어 무아레무늬 차수가 잘못 계산되는 일이 발생하므로, 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 오차증폭에 둔감한 차수추출법을 제안하였으며, 실제 측정을 통해 이를 확인하였다. 또한, 이중과장원리의 적용으로 고단차가 있는 물체를 측정하면서 무아레무늬위상과 높이와의 비선형성문제가 필연적으로 발생하게 되어, 이를 해결하기 위해 다평면 3D 보정법을 제안 적용하였다. 최종적으로 고단차가 있는 단차시편을 측정하여, 2π 모호성의 극복과 보정결과를 확인하였으며, 이로부터 이중과장위상천이영사식무아레법의 단차 측정정도를 계산할 수 있었다.

본 연구는 앞서 설명한 문제점과 이의 극복방법을 고안하였을 뿐만 아니라, 본 원리를 응용할 때 얻을 수 있는 실제적인 반복능과 측정정도를 산출하였다는 점에서도 의의를 찾을 수 있다. 그러나, 실제적인 적용에 있어서 측정시간이 기존의 방식에 비해 2 배가 더 소요되는 문제점과 보정이 까다로운 단점을 가지므로, 이를 해결하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) Meadows, D. M., Johnson, W. O. and Allen, J. B., 1970, "Generation of Surface Contours by Moiré Patterns," *Applied Optics*, Vol. 9, No. 4, pp. 942-947.
- (2) Takasaki, H., 1970, "Moiré Topography," *Applied Optics*, Vol. 9, No. 10, pp. 1467-1472.
- (3) Yoshino, Y. and Tsukiji, M., 1976, "Moiré Topography by Means of a Grating Hologram," *Applied Optics*, Vol. 15, pp. 2414-2417.
- (4) Kujawinska, M., 1987, "Use of Phase-Stepping Automatic Fringe Analysis in Moiré Interferometry," *Applied Optics*, Vol. 26, No. 22, pp. 4712-4714.
- (5) Creath, K., 1988, "Phase-Measurement Interferometry Technique", *Progress in Optics*, Vol. 26, pp. 349-398.
- (6) Creath, K., Cheng, Y.-Y. and Wyant, J. C., 1984, "Two-Wavelength Phase-Shifting Interferometry," *Applied Optics*, Vol. 23, No. 24, pp. 4539-4543.
- (7) Cheng, Y.-Y. and Wyant, J. C., 1985, "Multiple-Wavelength Phase-Shifting Interferometry," *Applied Optics*, Vol. 24, No. 6, pp. 804-806.
- (8) Matsumoto, T., Kitagawa, Y. and Minetomo, T., 1996, "Sensitivity-Variable Moiré Topography with a Phase Shift Method," *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 6, pp. 1754-1760.
- (9) Li, J. L., Su, H. J. and Su, X. Y., 1997, "Two-Frequency Grating Used in Phase-Measuring Profilometry," *Applied Optics*, Vol. 36, No. 1, pp. 277-280.
- (10) 김승우, 최이배, 오정택, 정문식, 1998, "위상천이격자를 이용한 영사식 모아레," 한국기계학회 논문집 A 권, 제 22 권, 제 5 호, pp. 850-857.
- (11) Idesawa, M., Yatagai, T. and Soma, T., 1977, "Scanning Moiré Method and Automatic Measurement of 3-D Shapes," *Applied Optics*, Vol. 16, No. 8, pp. 2152-2162.
- (12) Kurokawa, H., Ichikawa, N. and Yajima, N., 1990, "Fringe Scanning Moiré Using Servo Controlled Grating," SPIE, Vol. 1332, Optical Testing and Metrology III : Recent Advanced in Industrial Inspection, pp. 643-654.
- (13) Matins, H. A., Birk, J. R. and Kelley, R. B., 1981, "Camera Models Based on Data from Two Calibration Planes," *Computer Graphic and Image Processing*, Vol. 17, pp. 173-180.
- (14) Choi, Byoung K., 1991, *Surface Modeling for CAD/CAM*. Seoul, Korea, ELSEVIER.