

파장 주사 간섭계를 이용한 불연속면의 표면 형상 측정 알고리즘

An Algorithm for Discontinuous Surface Profile Measurement using Wavelength Scanning Interferometer

우현구*, 강철무, 조형석
(Hyun-Gu Woo, Chul-moo Kang and Hyung-Suck Cho)

Abstract : Inspection and shape measurement of three-dimensional objects are widely needed in industries for quality monitoring and control. Recently, the shape measurement using interferometric principle is found to be a successful methodology among other visual or optical technologies. Especially, the measuring method using wavelength scanning interferometer(WSI) has a great advantage in comparison with other conventional interferometric methods in that the absolute distance from the reference surface can be directly obtained from the amount of interferometric phase change. However, the measurement methods using WSI proposed by other researchers have low measurement resolution so far because they can't measure fractional phase change. To avoid this shortcoming, we propose a new algorithm in this paper, which can obtain a small amount of even fractional phase change by sinusoidal function fitting. To evaluate the effectiveness of the proposed sinusoidal function fitting algorithm, a series of measuring experiments are conducted for discontinuously shaped specimens which have various height. The proposed algorithm shows much more enhanced measurement resolution than other existing conventional algorithms such as zero crossing algorithm and Fourier transform algorithm.

Keywords : wavelength scanning interferometer, fractional phase measurement, sinusoidal function curve fitting, discontinuous surface profile measurement

I. 서론

광을 이용한 비접촉식 3차원 측정 기술은 최근에 급속히 발전한 광전자 기술을 바탕으로 요소 부품의 3차원 측정 요구 정밀도를 만족시키기 위해 연구가 활발히 진행되고 있는 측정기술로서, 곡면에 투사한 광의 간섭이나 반사를 이용하여 정해진 위치에서의 곡면 높이를 획득하는 측정 방식이다. 현재까지 확립된 기술로서 광 삼각법(optical triangulation method)이나, 위상 천이 간섭계(phase shift interferometer), 백색광 간섭계(white light interferometer), 모아레법(Moire method), 공초점 주사 현미경법(confocal scanning microscopy) 등이 있다.

일반적으로 레이저 광의 초점의 직경을 1~2 μ m 이하로 하기는 힘들며, 이러한 레이저 빔의 크기 제한으로 인해 레이저를 이용한 광 삼각법은 측정 정밀도가 다른 광학식 측정 방법에 비해 상대적으로 낮다[1]. 레이저 광의 위상을 이용하여 측정하는 방법은 레이저의 위상이 2π 마다 반복되어 나타나는 '2 π 모호성(2 π ambiguity)'의 문제로 인해 측정이 어렵다. 더구나 불연속적인 단차 형상을 갖는 표면의 높이 측정에 있어서는 측정되는 위상량과 이 위상량에 2π 의 배수만큼 더한 위상량을 구분할 수 있는 방법이 없기 때문에, 실제 모아레 방법과 위상 천이 간섭계에서 이를 보완하기 위한 기계적인 구동부가 있다고 하더라도 완전한 해결책이 되지 못한다[2-4]. 백색광 주사 간섭계나 공초점 주사 현미경법은 시스템에 구동 부위가 필수적이어서 복잡도가 증가하는 단

점이 있다[5][6].

따라서 3차원 형상 측정에 있어서 '2 π 모호성'문제와 기계적인 이송부의 존재로 인한 시스템의 복잡도 증가 문제를 해결하기 위해 파장 주사 간섭계(Wavelength Scanning Interferometer)가 널리 연구되고 있다[7][8]. 파장 주사 간섭계가 3차원 측정에 처음으로 적용된 것은 Takeda[9] 등이 Fourier 변환을 이용해서 물체의 형상을 측정한 사례이다. 이 방법은 레이저 파장을 변화시키면서 측정하는 동안, 하나의 측정 점에서 반사된 레이저 광의 총 위상 변화량은 그 시간동안 레이저 광 신호의 시간에 대한 주파수와 비례한다는 사실에 근거해서 주파수를 구함으로써 측정 점의 높이를 알아내는 방법이다. 반사된 레이저 광의 세기 신호로부터 위상의 변화량을 구하여 3차원 측정을 하는 또 다른 하나의 방법은 Kuwamura[10] 등이 실시간 측정을 위해서 제안한 zero crossing 알고리즘이 있다. 이 방법은 보다 빠른 신호처리를 위하여 각 측정 점에서 반사된 레이저 광의 세기 신호를 평균값에 대해 몇 번이나 통과했나를 세어서 위상 변화량을 알아내고 이로부터 각 측정 점의 높이를 알아내는 방법이다. 위의 두 가지 3차원 측정 방법은 레이저 광 신호로부터 위상 변화량을 알아내는 방법이 다르지만, 공통적으로 각 측정 점에서 반사된 레이저 광의 위상 변화량이 바로 간섭계의 기준면에 대한 물체의 높이에 비례한다는 사실에 근거한 측정 방법들이다. 여기서 물체의 높이는 위상 변화량과 비례하므로 위상 변화량을 정확히 알아내는 것은 바로 측정 정밀도를 결정하는 중요한 요소가 되지만 위의 두 방법들은 작은 위상 변화량을 측정하지 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 레이저 광의 신호로부터 보다 정확한 위상 변화량을 측정할 수 있는

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2002. 11. 10., 채택확정 : 2003. 4. 3.

우현구 : 경일대학교 기계공학부(hgwoo@kiu.ac.kr)

강철무 : Advanced Technology Inc.(cmkang@ati2000.co.kr)

조형석 : 한국과학기술원 기계공학부(hscho@lca.kaist.ac.kr)

새로운 알고리즘을 제안하고자 한다. 이의 효과를 보여주기 위하여 본 논문에서는 파장 주사 간섭계를 구성하고 대표적인 불연속면인 단차를 갖는 시편에 대한 측정 실험 결과를 보여준다.

II. 파장 주사 간섭계(Wavelength Scanning Interferometry) 측정 원리

그림 1과 같이 단 파장 레이저를 사용하는 Twyman-Green 간섭계[11]를 꾸몄을 때, 레이저 광은 beam splitter로 입사되어 2개로 나누어지고 하나는 기준면으로 진행하여 반사되고, 하나는 물체에 조사되어 물체 표면에서 반사된다. 이렇게 반사된 두 레이저 광이 beam splitter에서 다시 합쳐져서 간섭된 레이저 광이 측정 카메라로 입사된다. 일반적으로 전자기파 이론에서 기준파와 측정파의 전자기장은 다음과 같이 복소수 형태로 표현될 수 있다.

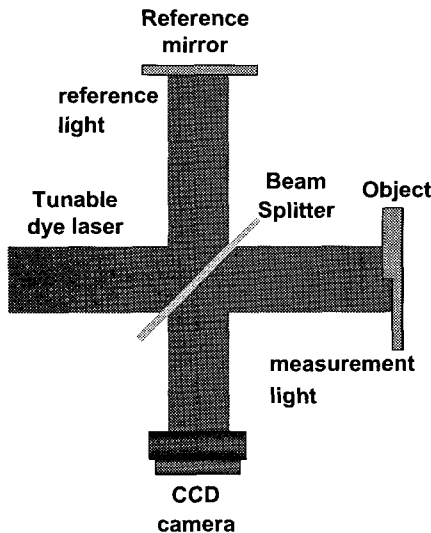


그림 1. Twyman-Green 간섭계를 이용한 WSI system 개략도.
Fig. 1. Schematic diagram of a WSI(Wavelength Scanning Interferometer) using Twyman-Green interferometer.

$$\text{기준파} : u_r = U_r e^{j(\omega t + \phi_r)} \quad (1)$$

$$\text{측정파} : u_m = U_m e^{j(\omega t + \phi_m)} \quad (2)$$

여기서 U_r 과 U_m 은 각각 기준면과 측정면에서 반사되는 광의 진폭을 나타내고, ϕ_r 과 ϕ_m 은 각각 기준면과 측정면에서 반사되는 광의 위상을 나타낸다. 기준파와 측정파에 의해서 생기는 간섭파는 다음과 같이 (3)과 같이 표현되고 광도 I 는 (4)와 같이 나타난다.

$$\text{간섭파} : u = u_r + u_m \quad (3)$$

$$I = u \times u^* = U_r^2 + U_m^2 + 2U_r U_m \cos(\phi) \quad (4)$$

여기서 위첨자 *는 공액 복소수를 의미하며, 위상차 ϕ 는 ($\phi_r - \phi_m$)를 나타낸다. 이때 나누어진 두 레이저의 경로차를

생각해 보면 beam splitter와 기준면 사이의 왕복한 거리와 그리고 beam splitter와 물체의 표면사이를 왕복한 거리의 차가 된다. 즉 경로차는 기준면과 물체의 반사면의 차이 즉 기준면에 대한 물체의 높이(h)의 2배가 되고, 이 경로차는 두 레이저 광의 위상 차이(ϕ)와 레이저의 파장(λ)의 곱이 된다. 위상의 단위를 라디안(radian)으로 하면 두 레이저 광의 경로차는 $\frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda$ 로 나타나고 이것이 $2 \cdot h$ 와 같아야 하므로 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\phi = 4\pi \frac{h}{\lambda} \quad (5)$$

1. WSI(Wavelength Scanning Interferometry)의 원리

파장 주사 간섭계는 일반적인 Twyman-Green 간섭계에서 단파장 레이저 대신 파장을 변화시킬 수 있는 레이저 광원을 이용하고 면적에 대한 측정이 가능하도록 레이저 빔의 크기를 크게 해서 물체에 조사하는 시스템으로 구성되며, 개략도를 그림 1(a)와 같이 나타낼 수 있다. 이와 같은 파장 주사 간섭계에서 카메라로 하나의 측정 점을 관측하였을 때 레이저 파장이 조금 변화하여 다른 파장으로 바뀌게 되면, 레이저 광의 간섭 위상이 변하게 된다. 즉 (5)에서 레이저의 파장이 λ_1 에서 λ_2 으로 바뀌었다고 하면, 하나의 측정 점에서의 위상의 변화량은 다음 (6)로 나타난다[7].

$$\phi_1 - \phi_2 = 4\pi h \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (6)$$

(6)는 다음 (7)과 같이 다른 형태로 표현될 수 있다.

$$\phi_1 - \phi_2 = 4\pi h \frac{\delta\lambda}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (7)$$

여기서 $\delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 이다. 파장을 λ_1 에서 λ_N 까지 단계적으로 변화시키면 전체 총 위상 변화량($\Delta\phi$)는 다음과 같다.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_N = 4\pi h \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_N} \right) = 4\pi h \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1 \lambda_N} \quad (8)$$

여기서 $\Delta\lambda = \lambda_N - \lambda_1$ 이다. 실제적으로 파장 주사 간섭계에서는 원래 레이저 파장(본 논문에서는 570 nm)에 비해 변화시키는 파장 범위(본 논문의 실험에서는 최대 14 nm)가 매우 적으므로 (8)은 다음 식과 같이 근사될 수 있다.

$$\Delta\phi \cong 4\pi h \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1^2} \quad (9)$$

(9)에서 레이저 파장과 파장 주사 범위가 정해져 있을 때, 총 위상 변화량($\Delta\phi$)은 측정 점의 높이에 비례함을 알 수 있다. 따라서 파장 주사 간섭계에서는 측정 점에서의 밝기 값의 변화 즉 위상의 변화량을 측정한다면 바로 높이를 알 수 있기 때문에 2π 모호성 없이 높이를 측정할 수 있다. 그림 2에서는 일정 시간 간격으로 정해진 파장 증분 만큼 레이저 파장을 증가시키면서, CCD 카메라로 측정 점에서 반사되고 간섭 되어진 레이저광의 위상을 측정할 때, 측정 점에서의

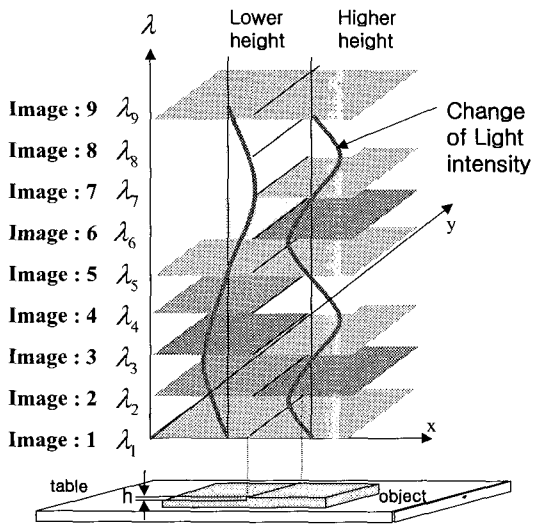


그림 2. 파장 주사 간섭계의 원리.
Fig. 2. Principle of wavelength scanning interferometer.

위상의 변화를 개념적으로 간략하게 나타내고 있다. 여기서 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 는 $\lambda + \delta\lambda, \lambda + 2\delta\lambda, \lambda + 3\delta\lambda, \dots$ 이고 image1, image2, image3, ... 는 레이저 광원이 각 파장일 때 CCD 카메라에서 획득된 영상으로서, 물체에서 반사되고 간섭 되어진 광의 밝기를 나타내고 있다. 여기서 간섭된 레이저 광의 광도를 살펴보면 원래의 레이저 광의 파장 길이보다 변화시키는 레이저 광의 파장 범위가 매우 적다는 가정 하에 (4)과 (9)에 의해 변화하는 간섭광의 광도는 cosine함수의 형태로 주어지고 주기적으로 변화한다는 것을 알 수 있다. 그림 2에서 측정 물체는 높이가 h만큼 차이나는 단차를 가진 물체에 대한 것으로서 높이가 높은 면과 낮은 면에서 관찰되는 레이저광의 위상 변화를 보여주고 있으며, 높이가 높은 면에서는 그만큼 위상 변화가 빠르게 이루어져 레이저 광원의 파장 변화에 대하여 간섭된 광의 위상의 변화가 빠르고 따라서 측정되는 광의 밝기가 빠른 주기를 갖고 변화한다는 것을 보여주고 있다. 여기서 높이가 같은 물체의 면에 대해서는 같은 위상의 간섭된 레이저 광의 밝기가 측정되므로 일정한 밝기를 갖는 것으로 측정된다. 즉 그림 2에서 CCD 카메라로 레이저 광원의 파장을 변화시키면서 측정 물체의 표면에서 반사되고 간섭 되어진 레이저 광의 위상 변화량을 관찰하면, 각 측정 점에 대한 위상 변화량은 측정 점의 높이에 비례하므로 위상 변화량을 측정함으로써 바로 측정 점의 높이를 계산할 수 있는 파장 주사 간섭계의 가장 큰 장점을 잘 알 수 있다.

III. 정밀 위상 측정 알고리즘

1. 기존 위상 측정 알고리즘

간섭된 레이저 광의 위상 변화량은 일정한 시간 간격으로 얻어낸 CCD 카메라의 영상으로부터 구하게 되므로 각 측정 점에 대한 위상 변화량은 일정 시간 간격으로 이산화된 밝기 신호로부터 구하게 된다. 현재까지 발표된 바에 의하면 밝기 값의 변화로부터 위상의 변화량을 측정하는 방법은 크게

Fourier 변환 방법[9]과 zero crossing 방법[10]이 있다. Fourier 변환 방법은 레이저 광원의 파장이 일정 간격으로 변화할 때 영상으로 측정되는 레이저 광의 밝기 값의 변화는 주기적인 조화함수로 나타나므로 이의 주파수 성분과 밝기 값의 총 위상 변화량이 서로 비례 관계가 있다는 것에 착안한 것으로, Fourier 변환으로 측정되는 레이저 광 밝기 변화의 주파수를 알아냄으로써 위상 변화량을 알아내는 방법이다. 밝기 신호의 이산화 된 값에 대한 discrete Fourier Transform을 살펴보면, 다음 (10)과 같이 정의될 수 있다.[12]

$$F\left(\frac{n}{NT}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} f(kT)e^{-2\pi i k \frac{n}{N}} \quad (10)$$

여기서 밝기 신호는 함수 f 에 해당하고, 이것의 discrete Fourier Transform은 F 에 해당된다. N 은 전체 sampling 수이며 획득된 영상의 수를 의미하며 T 는 이산 시간(sampling time interval)을 나타내고 n 은 $0, 1, \dots, N-1$ 의 값을 갖는 정수이다. 그런데, 여기서 좀 더 자세히 살펴보면 Fourier 변환 후의 주파수 성분에 해당하는 $\frac{n}{NT}$ 는 $0, \frac{1}{N}, \frac{2}{N}, \dots, \frac{N-1}{N}$ 의 일정한 간격으로 이산화된 값만을 갖게 된다. 이렇게 이산 신호에 대해서는 구해진 주파수 성분이 이산 분포를 띠기 때문에, Fourier 변환 후 주파수 성분을 찾고 이로부터 위상 변화량을 구하는 것은 이산 주파수 증분의 해상도 오차를 수반할 수 밖에 없다. 즉 측정되는 레이저 광의 밝기 신호의 위상 변화량에 비례하는 신호 주파수의 가장 가까운 이산 주파수를 계산할 수 밖에 없어 정확한 위상 변화량을 구하는데 한계가 있다. 한편 zero crossing 방법은 보다 빠른 실시간 측정을 위해 고안된 방법인데, 측정되는 레이저 광의 평균 밝기 값을 간단한 계산으로 계속 구하면서 파장이 변함에 따라서 밝기 값이 평균 밝기 값을 몇 번 지나는지 횟수를 세고 이로부터 위상의 변화량을 측정하는 방법이다. 따라서 이 방법은 위상의 변화량을 측정할 때, π 의 정수배만을 측정하므로 최대 오차 2π 를 갖게 되며, 이러한 오차는 정밀한 소형 물체의 형상 측정에 있어서 정밀도의 한계를 크게 낮추게 된다. 따라서 본 논문에서는 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 측정 점에 대한 간섭된 레이저 광의 밝기 변화에서 보다 정밀한 위상 변화량을 구하는 다음과 같은 알고리즘을 개발하여 제안하고자 하며, 이것은 전체 시스템의 측정 정밀도를 향상시키는데 결정적인 요인이 된다.

2. 조화 함수 curve fitting을 통한 정밀 위상 측정 알고리즘

파장 주사 간섭계에서 어느 측정 점에 대한 간섭된 레이저 광의 밝기 신호의 위상 변화량은 다음 (11)과 같이 2π 의 정수배와 나머진 부분 위상(fraction phase, ϕ)부분으로 나누어질 수 있다.

$$\phi = 2\pi \times N + \phi_0 \quad (11)$$

여기서 N 은 정수이다. 기존의 zero crossing 알고리즘은 ϕ 를 고려하지 않고 높이 정보를 계산하므로 측정 분해능에 한계가 존재하며 Fourier 변환 방법도 이 부분 위상 변화량에 대해서는 이산화된 주파수 값이 정확하게 나타낼 수 없으므로 역시 측정 분해능에 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는

ϕ 의 양을 보다 정확히 알아내어 높이를 계산하기 위해서 조화함수 curve fitting을 제안하고자 한다. 조화함수 curve fitting은 밝기 값 변화 신호를 cosine신호로 가정하여 이들 함수의 계수와 위상 값을 최소 오차 자승법(least square method)을 이용하여 구한다. 이렇게 구해진 보다 정확한 위상 값을 이용하면 물체의 높이 값을 보다 정확하게 계산할 수 있다.

지금까지는 레이저 광원의 파장이 변화할 때 광원의 밝기는 일정하다고 가정하여 측정에 대한 설명을 하였지만 실제 측정 실험을 살펴보면 파장 가변 레이저 광원으로 사용한 dye laser는 파장이 변화함에 따라 전체적인 레이저 광원의 밝기가 변화한다. 따라서 이러한 전체적인 광의 세기 변화를 없애주기 위하여 다음과 같은 정규화(normalizing)를 통한 보상(compensation) 과정을 거쳤다. 그림 3(a)와 같이 CCD카메라로 얻어진 i번째 영상에서 어느 한 pixel 밝기 값을 $I(i)$ 라고 하자. 그리고 그림 3(b)와 같이 다른 광 센서로 따로이 측정되어진 dye laser의 전체 레이저 밝기 값의 i번째 이산 신호를 $V(i)$ 라 하고, 첫번째 밝기값 $V(1)$ 으로 두 번째 밝기값 이후의 $V(i)$ 를 나누어 얻어진 신호는 $V_n(i)$ 라고 하자. 여기서 아래 첨자 n은 정규화(normalize) 되었다는 것을 의미한다. 그러면 dye laser의 파장 변화에 따른 광원의 밝기 값 변화의 영향을 없앤 간섭 무늬의 밝기 값은 다음 (12)과 같이 나타나며, 그림 3(c)에 나타나 있다.

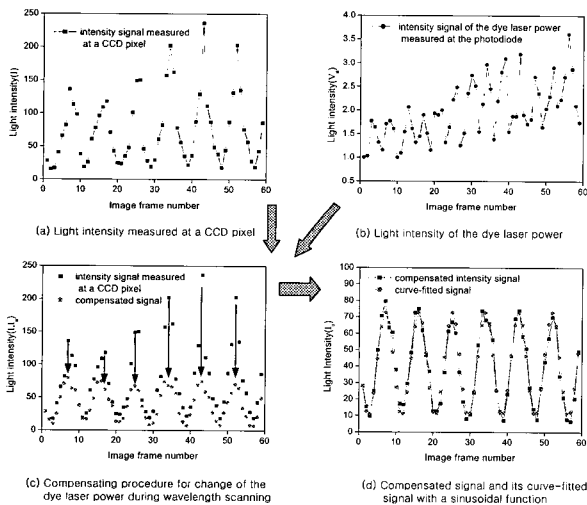


그림 3. 조화함수 curve fitting 과정.

Fig. 3. Procedures of the proposed sinusoidal function curve fitting algorithm.

$$I_n(i) = \frac{I(i)}{V_n(i)} \quad (12)$$

이 $I_n(i)$ 에 대하여 최소 오차 자승법(least square method)을 적용하여 조화함수 curve fitting을 행하여 이로부터 부분위상(fractional phase)까지 알아내어 보다 정밀 위상 측정이 가능하게 된다. 최소 오차 자승법의 적용을 위하여 가정된 조화함수와 실제 측정 신호(I_n)의 차이를 다음 (13)식과 같이 오차(E)로 정의하고, (14)와 같이 각 파라미터(a,b,c,d)에 대한 편미분 값을 0으로 하여, 오차를 최소로 하는 조화함수의 파라미

터들을 Newton-Rhapson 방법으로 구하였으며 실제 위상 변화량을 구하기 위한 파라미터는 b,c의 값이다.

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} [(I_n(i) - (a \cos(b \times i - c) + d))^2] \quad (13)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad (14.1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = 0 \quad (14.2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c} = 0 \quad (14.3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial d} = 0 \quad (14.4)$$

여기서 N은 측정 횟수를 낸다. 위 식들에서 a와 d는 각각 2차 편미분 값을 구해보면 항상 0보다 크게 나타나 해가 유일함을 증명할 수 있으나, 본 논문에서 중요한 b와 c는 유일함이 증명되지 않아 최소한 부분적인 범위에서는 최적 해이지만 항상 전 범위에서 최적의 해임은 증명되지 않는다. 이에 대해서는 구해진 실제 신호값과 curve fitting하여 구한 조화 함수의 한 예를 그림 3(d)와 같이 구해보면 제대로 b,c를 구하였는지 여부를 확인할 수 있다. 실제적인 문제에서는 측정 대상물의 연속된 표면에 대해서는 한 점에서 구한 b,c의 값이 바로 옆의 측정 점에서 구한 값과 크게 차이가 나지 않으면 올바른 b,c 값을 구하였다고 생각될 수 있다.

IV. 정밀 위상 측정 알고리즘을 이용한 단차 표면 형상 측정

1. 측정 시스템

실제의 WSI 측정 시스템을 그림 4와 같이 구성하였으며, 파장 가변 레이저 광원으로서 dye laser를 사용하였다. 원래 dye laser는 특성상 광학적 pumping이 필요한데, 본 연구에서 쓰인 장치에서는 Ar laser(6W Beamlok 2080, Spectra Physics Inc.)로 광 pumping하여 레이저 발진을 위한 에너지를 공급한다. 이 dye laser(899-21 RING, Coherent Inc.) 출력은 500 mW이며 파장 가변 영역은 570-590 nm 이다. 실제 실험에서는 정밀한 laser 파장 측정을 위하여 wavemeter(WA1500, Burleigh Inc.)가 사용되었다. 측정 실험 과정을 위의 3절에서 설명한 과정을 통해 총 위상 변화량을 구하고 2절에서 설명한 측정 원리와 (9)에 의해 물체의 높이를 구한다. 이러한 과정이 그림 5에 순서대로 나타내었다. 먼저 dye laser의 파장을 570 nm로 맞추는 다음 dye laser 출력이 안정화된 후에 photodiode로 레이저 출력을 측정하고 이때 간섭 영상을 획득하고 저장한다. 그 후 파장의 미소 변화 증분($\delta\lambda$), 여기서는 0.24 nm, 만큼 파장을 증가시키고 마찬가지로 dye laser 출력을 기록하고 간섭 영상을 저장한다. 이러한 과정을 반복하여 측정 파장 범위에 도달할 때까지 데이터를 측정 저장한다. 나중에 실험 결과로서 보여지겠지만 측정하는 파장 범위($\Delta\lambda$)가 클수록 측정 정밀도가 향상되는 것을 알 수 있다. 이렇게 정해진 측정 범위까지 측정 한 후에는 dye laser 출력의 변동에 따른 영상의 밝기 변화를 보정하기 위하여 앞의 3절에서 설명한 바와 같이

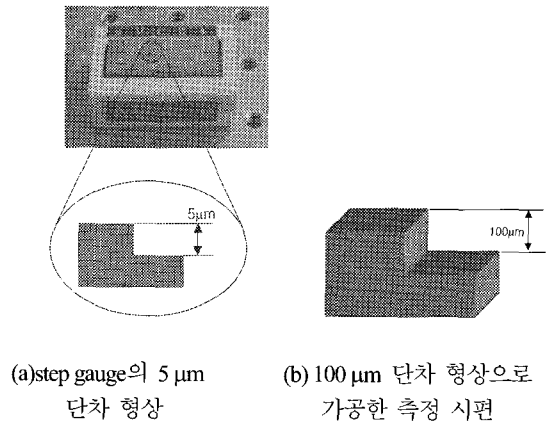
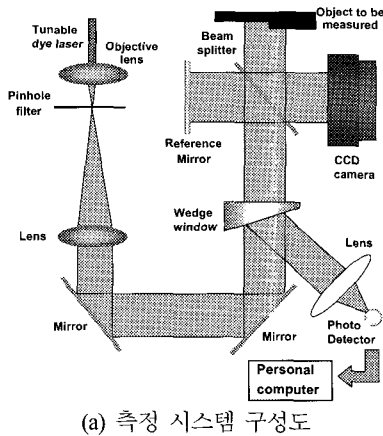


그림 6. 측정 시편들의 형상과 사진.

Fig. 6. Schematic shape and photograph of the specimen for measurement experiments.

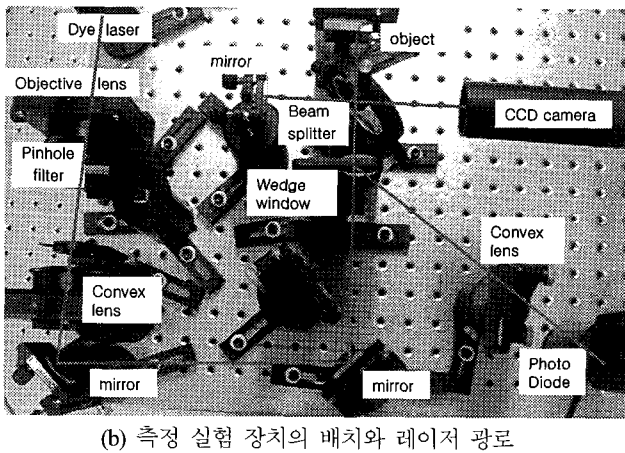


그림 4. 측정 시스템.

Fig. 4. The schematic diagram and the experimental setup for measurements.

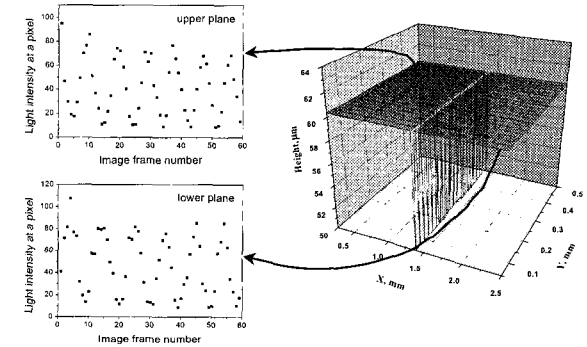


그림 7. Fourier 변환 방법을 이용한 5 μm 단차 측정 - 파장 스캐닝 범위, $\Delta\lambda$: 14 nm.

Fig. 7. The reconstructed surface profile of 5μm step surface using Fourier transform method - wavelength scanning range ($\Delta\lambda$): 14nm.

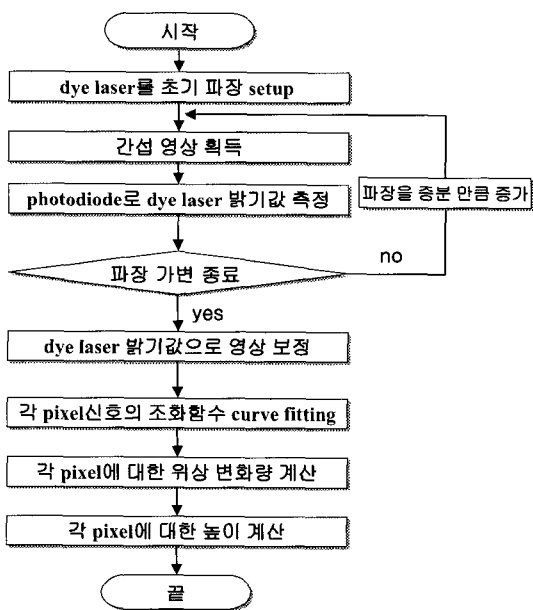


그림 5. 정밀 위상 측정 알고리즘 순서도.

Fig. 5. The flow chart for the proposed measurement algorithm.

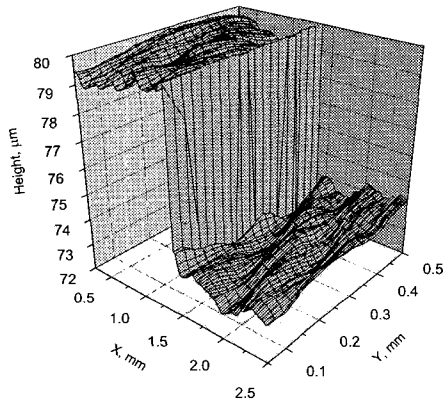
photo diode의 첫번째 신호로서 나머지 신호를 정규화하고 이 값들로 각 해당하는 영상 밝기를 나눈 것을 보정된 영상신호로서 간주한다. 이 신호에서 CCD 카메라의 각 pixel에 대한 데이터로 다시 정리하면, 파장의 변화에 따른 각 pixel에 대한 간섭 신호의 밝기 신호값을 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 신호를 조화함수 curve fitting을 통하여 신호가 변화한 총 위상 변화량을 계산하고, 이로부터 2절의 (9)을 이용하여 바로 높이를 구할 수 있다.

2. 단차 표면 형상 측정 결과

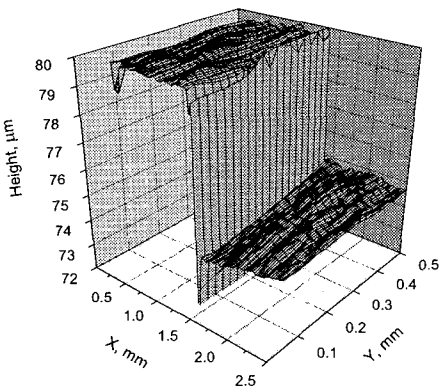
실험은 그림 6에 나타낸 바와 같은 단차의 높이가 5 μm, 100 μm인 두 가지의 시편에 대해서 실험을 행하였다. 5 μm 시편은 step gauge(Mitutoyo Inc.)를 이용하였고 100 μm 단차 시편은 파로이 정밀 가공하여 만들어서 사용하였으며, 표준 연구소 소재의 접촉식 측정기(분해능 20 nm)로 측정한 결과 95%의 신뢰도를 가질 때 높이 반복능이 최대 2.6-3.3 μm인 것을 검증하였다. 이 두 시편에 대하여 파장 스캐닝 범위를 8 nm, 14 nm인 경우에 대해서 실험을 행하여 총 4가지 조건으로 실험을 실시하였다.

우선 기존의 Fourier 방법으로 5 μm 단차를 14 nm의 파장 스캐닝 범위로 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다. 결과 그림에서 단차가 존재하는 부분에서는 골 모양의 불연속적인 형상이 측정되는데, 이는 표면의 기울기가 너무 커서 측정을 위해 조사된 laser광이 CCD camera에 거의 입사 되지 않아 측정이 안 되는 부분으로서 광을 일정한 정해진 각도로 조사하여 측정하는 모든 광학적 방법에서 측정이 불가능한 부분이라 생각된다. 그림 7의 왼쪽 위 그림이 그림 6(a)에서 위면에 해당하는 측정 결과이고 그림 7의 왼쪽 아래 그림이 그림 6(a)에서 아래 면에 해당하는 측정 결과를 나타낸다. 여기서 앞의 (9)를 이용하여 이론적으로 두 면에 대한 총 위상 변화량의 차이를 계산해 보면, 0.84π 가 된다. 그러나 이 위상 차이는 너무 작아 Fourier 방법으로는 이러한 미소한 위상 차이를 감지할 수 없어 시편의 두면은 같은 높이로 측정이 된다. 이러한 결과는 유한개의 위상 데이터를 가지고 신호 처리하는 discrete Fourier 방법이 가지고 있는 문제점이라 할 수 있다. 이러한 문제점은 기존의 zero-crossing 방법에서도 나타난다. 즉 총 위상의 차이가 0.84π 인데 비해 최대 측정 오차는 앞에서 언급한 바와 같이 2π 이므로 이와 같이 5 μm 의 미소한 높이 차는 측정할 수 없다.

본 논문에서 제안된 조화함수 curve fitting 알고리즘으로 형상을 측정된 결과는 그림 8-9에 나타나 있다. 그림 8에서 제안된 알고리즘을 사용하면 5 μm 의 높이를 갖는 단차 형상, 즉 0.84π 의 작은 위상차도 검출 가능함을 보여주고 있으며, 평편한 부분의 형상은 꽤 높은 측정 정밀도로 측정되고 있음을 알 수 있다. 그림 8(a)와 (b)를 비교해 보면 파장 스캐닝 범위가 큰 (b)의 경우가 더 매끈한 평면으로 측정되어 더 정밀함을 알 수 있고, 이는 스캐닝 범위를 크게 하면 미세 높이 차에 해당하는 총 위상 변화량의 차이도 따라서 선형적으로 커지게 되어 보다 높은 측정 정밀도를 가질 수 있음에 기인한다. 그림 7과 그림 8(a) 결과와 비교해 보면, 그림 8(a)의 경우가 파장 스캐닝 범위가 더 작음에도 불구하고 Fourier 방법에서는 측정 불가능했던 높이 차도 측정 가능하여 제안된 알고리즘의 우수성을 보다 명확하게 보여주고 있다[13]. 그림 9의 100 μm 의 높이 차를 갖는 시편에 대한 측정 결과를 보면, 비슷한 결과를 보여주지만 높이 차가 크기 때문에 상대적으로 측정이 쉬워서 깨끗한 형상 측정이 됨을 볼 수 있으며, 파장 스캐닝 범위가 클수록 평면의 형상이 매끈하게 측정되어 보다 정밀한 측정이 가능함을 보여주고 있다.



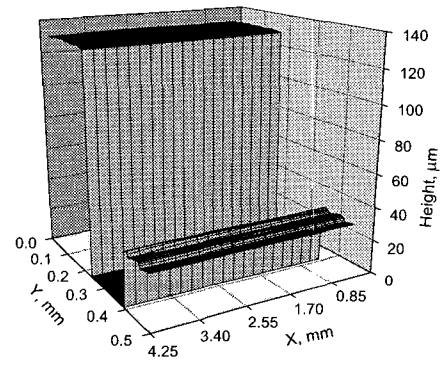
(a) 파장 스캐닝 범위, $\Delta\lambda$: 8 nm



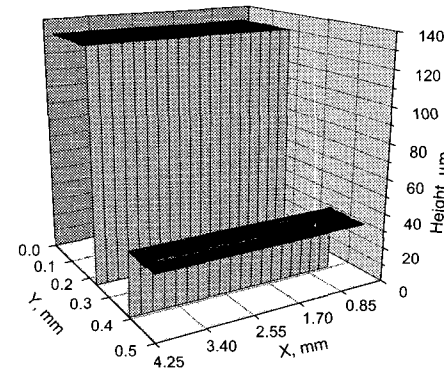
(b) 파장 스캐닝 범위, $\Delta\lambda$: 14 nm

그림 8. 정밀 위상 측정 알고리즘을 이용한 5 μm 단차 형상 측정.

Fig. 8. The reconstructed surface profile of 5 μm step surface using proposed algorithm.



(a) 파장 스캐닝 범위, $\Delta\lambda$: 8 nm



(b) 파장 스캐닝 범위, $\Delta\lambda$: 14 nm

그림 9. 정밀 위상 측정 알고리즘을 이용한 100 μm 단차 형상 측정.

Fig. 9. The reconstructed surface profile of 100 μm step surface using proposed algorithm.

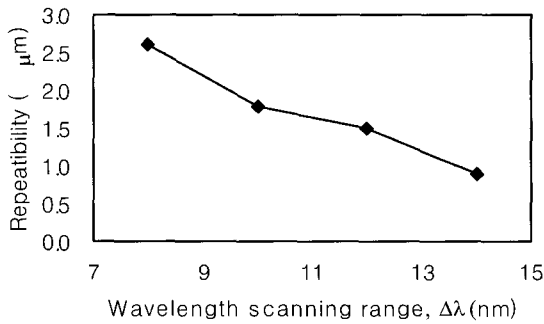
3. 측정 시스템의 정밀도

본 측정 시스템의 정밀도는 수직 높이에 대한 반복능(repeatability)와 수평 방향에 대한 분해능(lateral resolution)으로 나타낼 수 있다. 반복능은 측정 가능한 최소 눈금을 의미하며, 이를 구하기 위해서 높이를 아는 단차의 시편에 대해서 반복적으로 10번 실험을 수행하여 실제 값과 오차를 구하고 (15), (16)에서와 같이 95%의 신뢰 수준을 갖도록 오차의 표준 편차의 두 배를 반복능으로 정하였다.

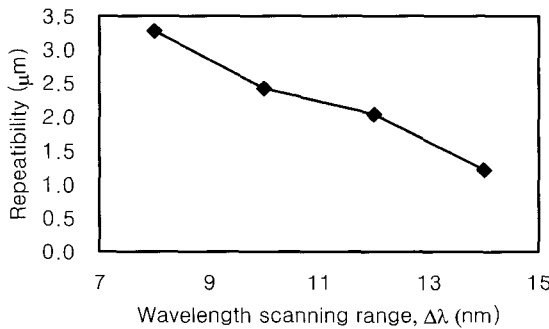
$$\sigma = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2 / (N-1) \right)} \quad (15)$$

$$\text{repeatability} = 2\sigma \quad (16)$$

여기서 h_i 는 각 측정점에서 측정된 높이, \bar{h} 는 실제 표준 시편의 높이, N 은 측정 횟수이다. 그림 10에 $5 \mu\text{m}$ 과 $100 \mu\text{m}$ 시편에서 여러 가지 파장 스캐닝 범위에 대해서 최대 표준 편차로 구한 반복능을 나타내었다. 파장 스캐닝 범위가 클수록 반복능이 감소하여 스캐닝 범위가 14 nm 일때 $1 \mu\text{m}$ 정도의 반복능을 얻을 수 있었다.



(a) 단차 : $5 \mu\text{m}$

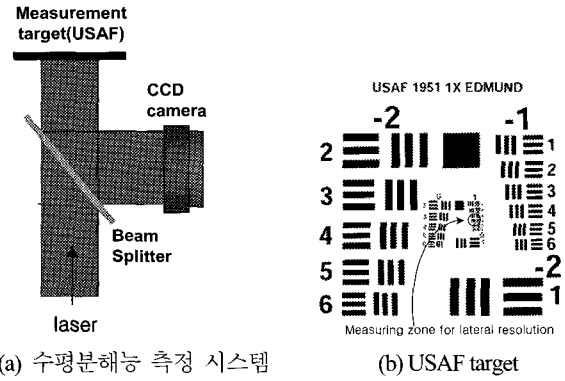


(b) 단차 : $100 \mu\text{m}$

그림 10. 파장 스캐닝 범위에 따른 반복능.

Fig. 10. Relationship between repeatability and wavelength scanning range.

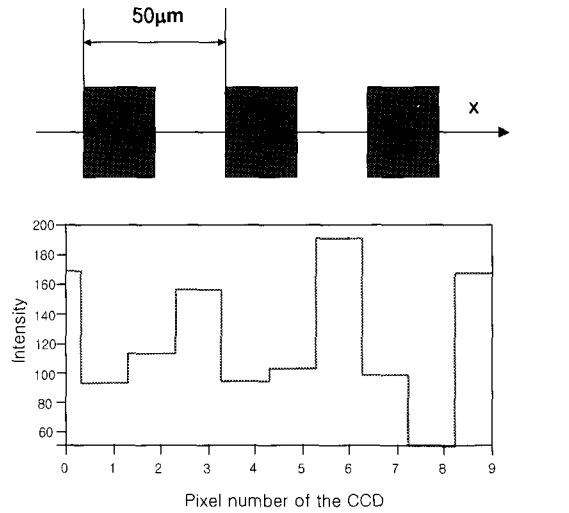
수평 분해능은 수평 방향으로의 분별 능력을 의미하며 여기서는 실험적으로 구하였다. 대상 물체로는 그림 11(b)의 USAF target(Edmund Science Co.)을 사용하였으며, 그림 11(a)와 같이 실제 측정물의 위치에 이것을 위치시키고 레이저 조명을 하였을 때 영상을 획득하였다. 이렇게 얻은 영상에서 여러 가지 간격을 갖는 각 line pair에서의 밝기 값



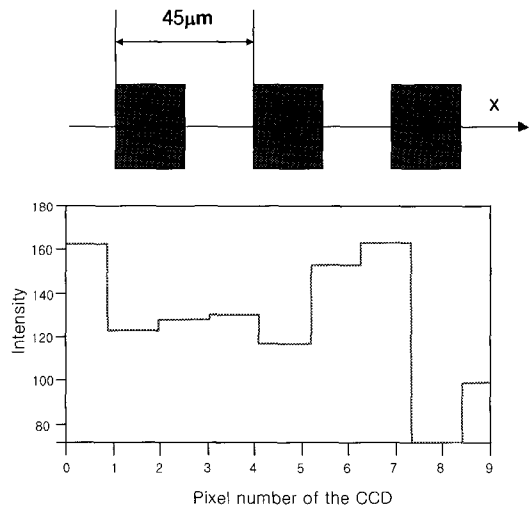
(a) 수평분해능 측정 시스템 (b) USAF target

그림 11. 수평 분해능 측정 시스템과 측정 target.

Fig. 11. Schematic diagram and standard target for measuring lateral resolution.



(a) $50 \mu\text{m}$ 의 line pair



(b) $45 \mu\text{m}$ 의 line pair

그림 12. CCD pixel에서 각 line pair의 밝기 값 분포.

Fig. 12. Intensity measured at CCD pixels for various line-pairs.

분포를 구하여 골과 마루의 값이 20%이상 차이가 나면 선을 구분할 수 있는 것으로 보아 분해 가능한 최소 거리의 간격으로 정하였다. 그림 12의 측정 결과를 보면 line pair의 간격이 50 μm 인 경우에는 골과 마루의 차이가 20%이상이어서 분해가능으로 판정하였고, 45 μm 인 경우에는 20%이하이어서 분해 불가로 판정하였다. 결과적으로 50 μm 의 line pair 분해능을 갖는다면 카메라의 한 pixel 은 25 μm 의 수평 측정 영역을 갖는 다는 것을 의미한다.

V. 결론 및 향후과제

WSI시스템에서 위상을 측정할 때 조화 함수 곡선 fitting을 이용해서 정밀 위상 측정이 가능하였다. 기존의 Fourier 변환 방법 또는 zero crossing 알고리즘과 비교했을 때 성능이 월등히 향상된 것을 알 수 있다. 향후에는 보다 복잡한 형상을 갖는 MEMS 구조물, BGA(Ball Grid Array)[14], CSP(Chip Scaled Package) 등의 실제적인 물체에 대해서도 측정 연구가 수행되어 진다면 기존의 방법에 비해 훨씬 정밀한 측정 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 레이저 광원의 발전에 따라 변화시킬 수 있는 파장의 범위가 보다 커진다면 측정 정밀도의 측면에서 그만큼 성능이 향상되므로 향후 파장 주사 간섭계를 이용한 측정법이 실제적인 측정 문제의 해결책으로 각광 받을 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

- [1] Steven, "3D vision system analysis and design," in *Three Dimensional Machine Vision*, Takeo Kanade Ed., 1987.
- [2] H. Takasaki, "Moire topography," *Applied Optics*, vol. 9, 1970.
- [3] K. Kreath, "Phase-measurement interferometry techniques," Ph.D. Dissertation, Optical Sciences Center, Univ. of Arizona, 1981.
- [4] Y. Y. Cheng, "Two-wavelength shift Interferometry," *Applied Optics*, vol. 23, no. 24, pp. 4539-4543, 1986.
- [5] T. Dresel, "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherent radar," *Applied Optics*, vol. 31, pp. 919-925, 1992.
- [6] J. F. Aguilar, "Imaging of spheres and surface profiling by confocal microscopy," *Applied Optics*, vol. 39, pp. 4621-4628, 2000.
- [7] H. Kikuta, "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light," *Applied Optics*, vol. 25, pp.2976-2980, 1986.
- [8] T. Li, "Optical scanning extrinsic Fabry-Perot interferometer for absolute microdisplacement measurement," *Applied Optics*, vol. 35, pp. 8858-8861, 1996.
- [9] M. Takeda, "Fourier-transform speckle profilometry : three dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/of spatially isolated surfaces," *Applied Optics*, vol. 33, pp. 7829-7837, 1994.
- [10] S. Kuwamura, "Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement," *Applied Optics*, vol. 36, pp. 4473-4482, 1997.
- [11] D. Malacara, "Twyman-green interferometer," in *Optical Shop Testing*, D. Malacara Ed., 1978.
- [12] P. V. Oneil, *Advanced Engineering Mathematics*, International Thomson Publishing, 1995.
- [13] C. M. Kang, "Discontinuous surface profile measurement using wavelength scanning interferometry," M. S. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2001.
- [14] C. M. Kang et al., "Inspection system for microelectronics BGA package using wavelength scanning interferometry," *Proc. of SPIE '01*, 2001.



우 현 구

1965년 2월 4일 출생. 1987년 서울대학교 기계설계학과 (공학사). 1989년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1997년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 2002년~현재 경일대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 공정제어, 광학 3차원

측정.



조 형 석

1944년 출생. 1971년 서울대학교 학사 1973년 Northwestern Univ.(공학석사) 1977년 Univ. of California, Berkeley(공학박사) 1977년-1978년 Univ. of California, Berkeley 연구원 1978년 ~현재 한국과학기술원 교수. 관심분야는 machine

vision, 광학 측정 시스템, 지능시스템/로보틱스, 생산공정.



강 철 무

1976년 10월 5일생. 1999년 한국과학 기술원 학사, 2001년 한국과학 기술원 석사 2001년~현재 ATI S/W development team. 관심분야는 PCB 검사, 3차원 측정.