

Shadow Mask 곡률 치수 측정 시스템 (Profile Measurement of Shadow Masks)

김기홍*, 김남현, 박현구, 김승우, 김동현
(한국과학기술원 정밀공학과)(금성사생산기술센터)

Ki-IHong Kim, Nam-Hyun Kim, Hyun-Gu Park, Seung-Woo Kim, Dong-Ilyun Kim

Abstract :

This paper describes a 3-dimensional profile measurement method which was intended especially for sheet metal products such as shadow masks. The method is based upon machine vision in which the height variation of the surface is measured by software auto-focus image processing techniques. The method is found suitable for flexible surfaces with interrupt.

1. 서론

새도우 마스크(shadow mask)는 텔레비전(TV)이나 컴퓨터 모니터의 브라운관 내에 설치되는 얇은 금속막판으로서, 전자총에서 방사되는 전자빔을 일정한 곳으로만 통과시키는 부품이다. 새도우 마스크에는 전자빔을 통과시키는 원형 또는 슬롯(slot)모양의 구멍이 가공되어 있으며, 새도우 마스크의 곡률방정식은 4차 이상의 복잡한 다항식으로 표현된다. Fig.1은 본 연구에서 사용한 15" 새도우 마스크이며 Fig.2는 현미경 프로브를 이용하여 획득한 새도우 마스크의 표면을 보여준다.

새도우 마스크의 생산공정은 다음과 같다. 먼저 에칭(etching)공정을 통하여 금속막판에 구멍을 가공한 후 프레스 가공을 이용하여 최종적인 새도우 마스크를 생산한다. 이때 새도우 마스크의 금형은 프레스 가공 후 탄성변형으로 일어나는 탄성복원(spring back)효과를 고려하기 위하여 실제 새도우 마스크의 설계방정식과는 다르게 가공이 된다. 하지만 금형설계에 있어서 이러한 탄성복원 효과를 이론적으로 정확하게 해석하여 반영한다는 것은 불가능하다. 따라서 실제 생산되어 나온 새도우 마스크의 측정된 형상데이터를 근거로 하여 금형을 수정한다. 따라서 새도우 마스크의 3차원 곡률형상을 정확히 측정할 수 있는 기술이 요구된다.

현재, 생산공회 분야에서 삼차원 형상을 측정하기 위하여 사용되고 있는 방법으로는 광상가법^[1], 모이레토포그래피^[2,3], 슬릿 광 형상 측정법^[4] 및 접촉식 프로브(touch-trigger probe)를 이용하는 삼차원 형상 측정법등이 있다. 본 연구의 측정 대상인 새도

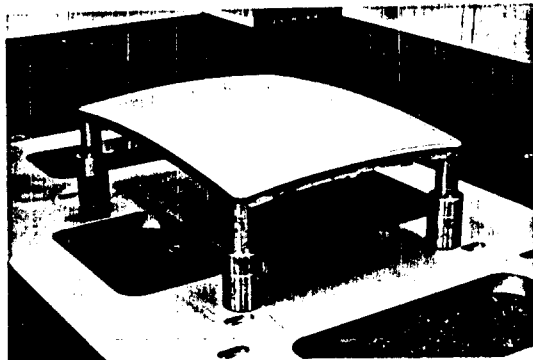


Fig.1 15" shadow mask

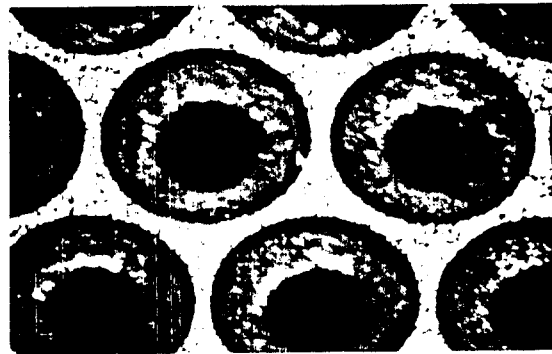


Fig.2 Surface of shadow mask

우 마스크를 측정하기 위하여 가장 많이 이용하는 방법으로는 접촉식 프로브를 이용한 측정방법과 레이저를 이용한 비접촉식 측정방법이 있다. 그러나 새도우 마스크는 미소한 힘에도 쉽게 변형하는 특성을 가지고 있어 접촉식 프로브의 사용은 곤란하다. 또한 레이저 빔을 이용한 비접촉식 방법의 경우에는 광상각법을 이용하는데 새도우 마스크상의 각종 구멍으로 인하여 측정이 불가능하게 된다.

본 연구에서는 앞서 언급된 방법들의 문제점을 극복할 수 있는 비접촉식 측정방법을 도입하고 이를 구현하는 측정 알고리즘을 개발하였다. 이는 광학 현미경을 삼차원 측정기에 장착하고 측정물의 표면위치는 영상처리 기법을 이용한 비접촉방법을 도입하여 자동으로 산출하는 방법이다.

2. 측정원리

2-1 측정시스템의 구성

본 연구에 사용된 전체 측정 시스템은 Fig.3에서 보는바와 같이 크게 3차원 측정기의 광학 현미경으로 구성된다. 광학 현미경에서 획득된 영상정보는 컴퓨터에 장착된 회상처리 회로(frame grabber)를 통하여 처리되며, 컴퓨터와 제이거사이는 RS-232C통신을 이용한다. 사용된 3차원 측정기의 분해능은

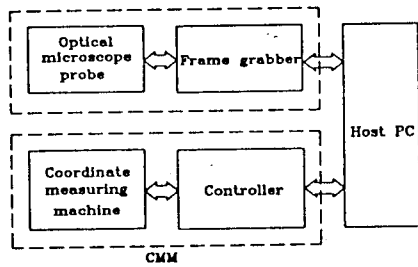


Fig.3 Block diagram of system

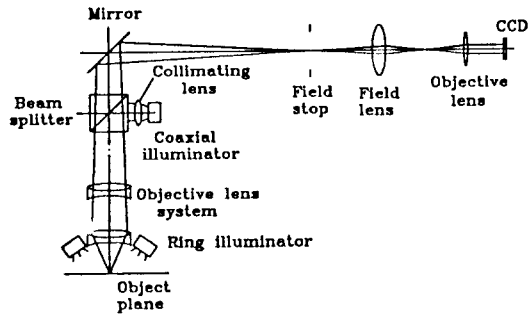


Fig.4 Optical configuration of microscope probe

1 μ m이고 위치정도는 $\pm 5\mu$ m이다. 비접촉 프로브의 광학계는 Fig.4와 같다. 측정물의 영상을 얻기 위한 조명으로는 동축조명(coaxial illuminator)과 나선조명(ring illuminator)을 이용한다. 동축조명만을 이용한 경우에는 곡률이 작은 가장자리부근에서는 CCD카메라에 집광되는 광량이 줄어들게되므로 측정물의 영상을 얻을 수 없다. 그러므로 이를 보완할 수 있는 나선조명이 필요하다. 본 연구에서는 붉은색의 발광 다이오드(LED)를 고리형태로 만든 나선조명을 이용한다. 측정물에서 반사된 빛은 대물렌즈(objective lens system)와 광분할기(beam splitter)를 거쳐서 CCD카메라에 입사된다. 프로브의 배율은 영상표시장치에서 x축 방향으로 1.153 μ m/pixel 이고 y축 방향으로는 1.134 μ m/pixel이다.

2-2 측정원리

접촉식 측정방법은 접촉구가 측정면에 접촉할 때 발생하는 접촉신호를 제이기가 감지하고 각 구동축의 위치센서로부터 측정값을 읽어내는 방식인 반면, 비접촉식 측정법은 CCD카메라로부터 얻어진 영상을 분석하여 측정하는 방식이다. Fig.5는 측정의 기본동작을 보여준다. 먼저 프로브는 측정할 새도우 마스크의 설계방정식에서 측정위치값을 산출하여 이동한다. 이 위치에서 프로브가 한정된 범위를 인정한 간격으로 움직이면서 CCD카메라로 들어오는 영상을 획득한다. 매 순간 획득된 영상은 영상 처리를 통하여 에너지를 계산하며 곡선맞춤을 이용하여 그림에서와 같은 에너지곡선을 얻는다. 이 에너지곡선에서 에너지값이 최고가 되는 위치가 측정점에서의 높이값이 된다. 측정점이 새도우 마스크상의 구멍에 위치한 경우에는 영상내에서 구멍이 아닌 여러 위치에서 이러한 에너지 곡선을 얻어낸 후 이들을 이용하여 최종적인 측정값을 산출해 낸다.

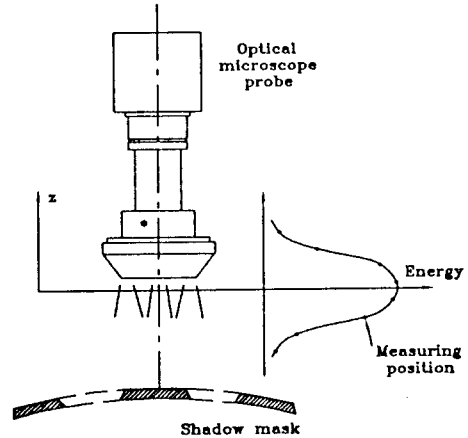


Fig.5 Basic principle of software autofocus

2-3 에너지(energy)

비접촉식 측정에 있어서 프로브의 위치는 프로브가 위치한 곳에서 읽어들이는 영상을 처리함으로써 결정된다. 따라서 CCD 카메라로부터 획득한 영상으로 프로브가 초점위치에서 얼마나 떨어져 있는지를 정량적으로 계산할 수 있는 방법이 필요하다. 일반적으로 초점이 맺혔는지를 검사하는 방법은 영상에 담겨있는 공간주파수(spatial frequency)성분을 분석한다. 프로브가 정확히 초점위치에 있을 경우에 카메라로부터 획득된 영상은 고주파성분을 많이 포함하게 되고, 초점위치에서 멀어짐에 따라 이러한 고주파성분은 줄어들게 된다. 따라서 정확한 초점위치는 영상에서 고주파성분의 포함정도로부터 정량적으로 결정지을 수 있다. 이러한 정량적인 값을 에너지라 정의한다. 에너지를 계산하는 방법으로는 프리에 변환법(fourier transformation), 농도값의 기울기 이용법(magnitude maximization), 고주파필터 이용법(high-pass filtering), 히스토그램 이용법(histogram entropy), 농도값의 분산 이용법(grey-level variance), 농도값차 이용법(sum-modulus difference) 및 패턴 인식법(pattern recognition)등이^{15,6,7)} 있다. 이러한 에너지함수들로 만들어지는 에너지 곡선(energy graph)의 형태는 Fig.6과 같은 정규분포곡선

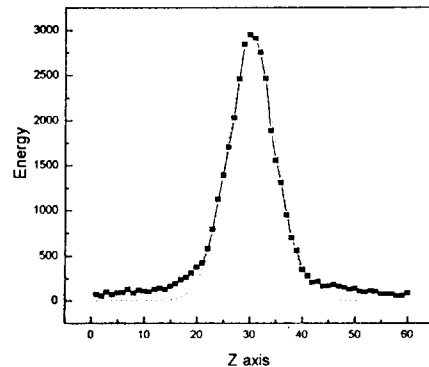


Fig.6 Energy graph

의 형태를 갖고 에너지값이 최고가 되는 점이 초점위치를 나타낸다. 자동 초점 알고리즘에 이용되는 에너지 함수는 에너지 곡선이 외란(noise)에 영향을 받지 않아야 한다. 본 연구에서는 효율적으로 초점위치를 찾기 위하여 2가지 종류의 에너지 함수를 이용한다.

2-3-1 SMD (sum-modulus difference)

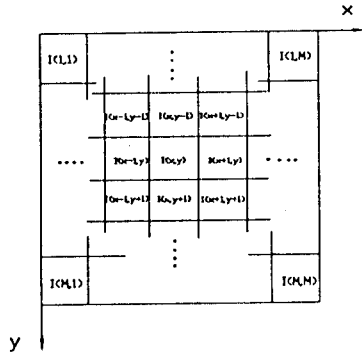


Fig.7 Image intensity map

CCD카메라로 부터 획득한 영상정보에서 이웃한 화소간의 농도값 차이를 이용하는 방법으로, 주요한 두 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$E_x = \sum_x \sum_y |I(x,y) - I(x-1,y)| \quad (1)$$

$$E_y = \sum_x \sum_y |I(x,y) - I(x,y-1)| \quad (2)$$

이때 영상좌표계 x y z는 Fig.7에 정의된바와 같다. 여기서 E_x 는 x축 방향의 에너지값으로 이웃한 두 화소간의 농도값차이를 구한 후 이의 절대값을 모두 더한값으로 정의된다. 마찬가지로 E_y 는 y축 방향으로 계산한 값이다. 최종적인 프로브 위치에서의 에너지값은 아래의 (3)식으로 표현된다.

$$E = E_x + E_y \quad (3)$$

2-3-2 소벨 연산자(sobel operator)

영상내에 포함된 각종 모서리(edge)는 초점이 맺힌 정도를 나타내는 중요한 요소이다. 영상내에서 모서리는 고주파성분으로 표현된다. 그러므로 초점이 정확히 맺힐수록 에너지값은 이러한 고주파성분으로 인하여 증가하게 된다. 새도우 마스크의 경우에는 가공된 구멍의 모서리와 표면의 미세한 요철등이 이러한 고주파성분을 가진다. 본 연구에서 이용된 소벨 연산자는 영상내의 임의의 위치에서 농도값의 기울기($\nabla I(x,y)$)를 계산하는 연산자로서 영상내의 모서리에서 큰 수치를 나타내게 된다. 이 방법은 공간 필터(spatial filter)를 이용하여 필터의 모양은 식(4)과 같다.

$$i_x = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad i_y = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

위의 필터계수를 이용하여 에너지는 다음과 같은 방식으로 산출한다.

$$S(x,y) = \sqrt{[i_x * I(x,y)]^2 + [i_y * I(x,y)]^2} \quad (5)$$

$$E = \sum_x \sum_y S(x,y)^2, S(x,y) \geq T \quad (6)$$

T : 임계값(threshold value)

식(5)에서 $i_x * I(x,y)$ 는 x방향 필터와 영상내의 x, y위치에서의 농도값과 컨볼루션(convolution)을 취한 값으로 x축 방향으로 농도값 기울기의 크기를 나타낸다. 마찬가지로 $i_y * I(x,y)$ 는 y축 방향으로 계산된 값이다. 따라서 $S(x,y)$ 는 x, y위치에서 농도값 기울기의 전체 크기를 나타낸다. 이때 에너지값은 식(6)에서처럼 영상의 전 범위에 대하여 농도값 기울기의 크기를 구한 후 이중 임계치 이상의 값들만을 제외한 후 취하여 얻는다.

3. 측정 알고리즘

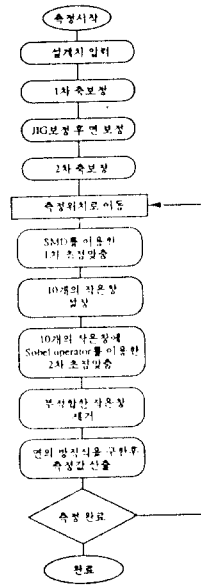


Fig.8 Measuring algorithm

새도우 마스크측정을 위한 전체 측정 알고리즘은 Fig.8과 같다. 알고리즘은 크게 측정 좌표계 보정 알고리즘과 자동 측정 알고리즘으로 구분된다.

3-1 좌표계 보정

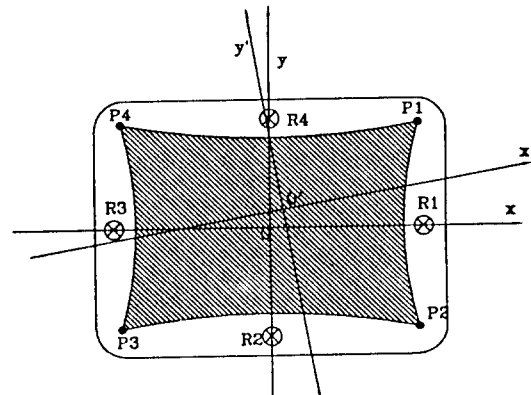


Fig.9 Coordinates of shadow mask

새도우 마스크 측정은 새도우 마스크상의 좌표계를 따라 수행된다. 측정물용 3차원 측정기상에 설치하였을때 측정기의 기계 좌표계(machine coordinate)와 측정물의 물체 좌표계(object coordinate)를 일치시킬 수 있으므로 기계 좌표계를 물체 좌표계로 변환시키는 좌표계 보정 알고리즘이 필요하다. Fig.9는 새도우 마스크의 좌표계 보정을 위한 기준점(reference mark)들의 위치를 보여준다. 그림에서 x y z는 새도우 마스크의 물체 좌표계를 나타내며 x' y' z'는 3차원 측정기의 기계 좌표계를 나타낸다. 물체 좌표계의 x축은 새도우 마스크의 장축으로 설정한다. 이러한 기준점은 새도우 마스크의 종류에 따라 크게 원형과 슬롯형이 있으며 슬롯형은 다시 슬롯이 한개만 새겨져 있는 것과 2개가 나란히 새겨져 있는 것이 있으며, 본 연구에 이용된 15"새도우 마스크의 기준점의 모양은 원형이다. 이러한 기준점은 새도우 마스크상에 4개가 가공이 되어 있으며 Fig.9의 R1 ~ R4는 그 위치를 나타낸다. 좌표계 보정은 다음과 같은 순서로 수행된다. 먼저 기준점 R1과 R3의 중심점의 위치를 측정한 후 이 중심점의 값들로 1차 직선 방정식을 유도하고 이를 x축으로 설정한다. 이때 중심점은 기준점들래의 8개의 위치를 측정한 후 최소자승법(least square method)를 이용하여 구한 원의 중심으로 한다. 최소자승법을 이용한 원의 중심은 아래의 수식으로 산출된다.¹⁸⁾

$$\begin{pmatrix} \sum(x_i^2 + y_i^2)^2 & \sum x_i(x_i^2 + y_i^2) & \sum y_i(x_i^2 + y_i^2) \\ \sum x_i(x_i^2 + y_i^2) & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i \\ \sum y_i(x_i^2 + y_i^2) & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum(x_i^2 + y_i^2) \\ \sum x_i \\ \sum y_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

식(7)에서 x_i, y_i 는 측정점의 위치값이며 A, u, v는 상수값이다. 이들로부터 원의 중심 a, b와 반경 R은 아래의 수식에서 산출된다.

$$a = -\frac{u}{2A}, b = -\frac{v}{2A}, R = \sqrt{a^2 + b^2 + \frac{1}{A}} \quad (8)$$

물체 좌표계의 원점은 위에서 구한 기준점간의 중심으로 설정한다. 새도우 마스크가 측정 지그(jig)에 설치되었을때 지그 높이차에 의한 새도우 마스크의 뒤틀림을 방지하기위해 지그 보정을 수행한다. Fig.9의 P1 ~ P4는 지그 보정을 위하여 측정되는 기준점의 위치를 나타내며 이는 새도우 마스크의 측정위치중 원점에서 가장 멀리 벌어져있는 4개의 대칭점으로 설정한다. 이 점들을 반복 측정하여 상대 높이차가 20 μ m이하가 되도록 지그를 조정한다. 지그 보정이 완료된 후 이 내점으로 면보정(plane calibration)을 수행한다. 면보정이 완료되면 지그의 조정으로 인하여 기준점들의 위치가 변하게 되므로 위에서 언급한 측 및 원점 보정을 다시 한번 수행한다.

3-2 창의 크기(window size)

창(window)이란 임의의 한 위치를 측정하고자 할때 이용하는 컴퓨터 화면상의 크기를 의미한다. 이상적으로 새도우 마스크를 측정할 경우 영상의 한 화소에서의 농도값 정보만 가지고 초점을 맞추어야 한다. 그러나 실제로는 한 화소에서의 정보만 가지고는 불가능하므로 이웃한 화소의 농도값 정보를 함께 이용해야 한다. 따라서 어느정도 범위의 농도값 정보를 이용하느냐에 따라 창의 크기가 정해지게 된다. 창의 크기는 작을수록 좋지만 지나치게 작은 경우에는 외란으로 인하여 잘못된 에너지값을 얻을 확률이 높아지게 되어 불안정한 에너지 곡선이 나타난다. 그러나 창의 크기가 지나치게 크면 측정할 높이값은 일정한 면적내의 평균 높이값이 되므로 측정정도에 있어서 문제가 된다. 따라서 측정할 새도우 마스크 종류 및 프로브의 배율에 따라 창의 크기를 조절하여 주어야 한다. 새도우 마스크측정에 있어서 최소한의 창의 크기는 표면에 나있는 구멍을 완전히 포함하는 크기여야 한다. 그러나 이러한 창으로 초점맞추기를 수행하면 앞에서 언급한 측정정도의 문제가 발생하므로 이를 보완하기 위하여 큰 창(main window)내에 다시 작은 창(sub window)들을 만들어 이용한다. 작은 창은 큰 창을 등간격의 격자로 분할하여 만든 창을 의미하며 측정위치에서의 측정값은 이러한 작은 창들중에서

구멍에 속하지 않는 작은 창의 초점위치값들로부터 산출된다. 본 연구에 있어서 큰 창의 경우 구멍은 217 \times 217 픽셀(pixels)을 이용하고 작은 창의 경우 31 \times 31 픽셀을 이용한다.

3-3 측정 알고리즘

광학 현미경을 이용한 비접촉식 측정에 있어서 측정이 효율적으로 수행되기 위해서는 프로브가 측정위치로 이동하였을때 초점위치가 초점위치 근처이여야 한다. 새도우 마스크의 측정에 있어서 이러한 초점위치값은 새도우 마스크의 설계 방정식에서 구해진다. 그러나 이러한 설계값은 새도우 마스크의 안쪽면에 대한 설계값이며 새도우 마스크의 곡부적인 변형등으로 인하여 실제 초점위치와는 차이를 보인다. 그러므로 프로브가 측정위치로 이동하였을때 어느정도 초점위치에서 벗어났는지 예측할 수 있다. 따라서 초점의 위치를 대략적으로 산출한 후 정밀한 초점맞추기를 수행하는 것이 측정시간을 단축할 수 있다.

본 연구에서는 진송한 SMD와 소벨 연산자를 이용하여 2차에 걸친 초점맞추기를 수행한다. SMD는 알고리즘의 구현이 간단하며 계산속도가 빠르므로 대략적인 초점위치를 산출하는데 이용한다. 소벨연산자는 각종 외란에 강하며 프로브가 미세한 범위내에서 움직이더라도 에너지값이 크게 변하므로 정확한 초점위치를 산출하는데 이용한다. 각 단계에서 얻어지는 에너지곡선의 형태는 Fig.10의 (a) (b)와 같다. 대략적인 초점위치를 산출하

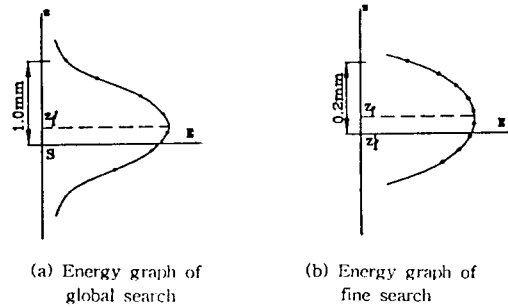


Fig.10 Energy graph of search

기 위해서 Fig.10(a)에서처럼 먼저 초점위치 S에서 z축으로 1.0mm를 이동한 후 0.2mm간격으로 이동하면서 큰 창의 에너지값을 계산한다. 에너지값이 최고가 되는 점에서부터 2점을 더 측정 한 후 이들 값들로 곡선맞춤을 수행하여 초점위치 z_1 를 산출한다. 이때 에너지곡선은 2차 곡선으로 단순화할 수 있으며 아래의 수식으로 표현한다.

$$E = az^2 + bz + c \quad (9)$$

그러나 에너지값과 z값 사이의 크기(scale)차이로 인하여 (9)식을 이용하면 잘못된 초점의 위치를 산출할 수 있게 된다. 따라서 반드시 정규화(normalizing)한 측정값을 이용하여야 한다. 본 연구에 있어서 이러한 정규화과정은 아래 수식에서처럼 단순히 z축 값을 상수배함으로써 쉽게 구현하였다.

$$z_n = C \times z \quad (10)$$

위 (10)식에서 C는 임의의 상수값이며 이는 실험적으로 결정한다. 이를 이용하여 (9)식은 다음과 같이 표현한다.

$$E = a'z_n^2 + b'z_n + c' \quad (11)$$

식(11)에서 상수 a', b', c'를 최소자승법을 이용하여 구한 후 초점위치를 산출한다.

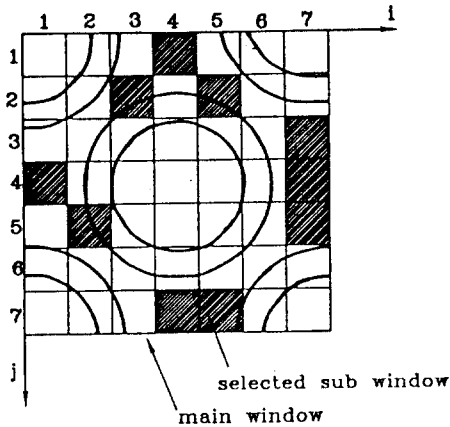


Fig.11 An example of selecting sub-windows in main window

1차 초점맞추기로 대략적인 초점위치출 산출한 후 작은 창을 이용하여 정밀한 초점맞추기를 수행한다. 1차 초점맞추기를 수행한 후 획득한 영상내의 작은 창들에 대하여 SMD를 이용하여 에너지값을 계산하며, 이중 에너지값이 큰 10개를 2차 초점맞추기에 이용하는 작은 창으로 설정한다. Fig.11은 2차 초점맞추기를 위하여 선택된 작은 창들의 예를 보여주며 C_{ij} 로 표현한다. 앞서 산출한 z_j' 에서 z축으로 0.2mm를 이동한 후 40 μm 간격으로 이동하면서 각각의 C_{ij} 에 대하여 소벨 연산자를 이용한 에너지곡선을 얻는다. Fig.10(b)는 이때 얻어지는 에너지곡선의 형태를 보여준다. 각각의 C_{ij} 에서의 초점위치값은 앞서 언급한 1차 초점맞추기의 동일한 방법으로 산출할 수 있으며 초점위치값은 z_{ij} 로 표현한다. 큰 창내의 새도우 마스크의 면은 그 크기가 곡률에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작으므로 아래 수식에서처럼 1차 평면으로 가정한다.

$$Ax_n + By_n + z_n + D = 0 \quad (12)$$

식(12)에서 x_n, y_n 는 C_{ij} 의 위치좌표값이며 z_n 은 z_{ij} 값이며 앞에서의 마찬가지로 정규화된 값들이다. 각 상수값은 최소자승법을 이용하여 산출한다. C_{ij} 설정할 때 새도우 마스크의 가장자리 부근에서는 구멍의 경사진면에서의 반사광이 표면에서의 반사광보다 상대적으로 밝아서 잘못된 창을 설정할 수 있다. 따라서 (12)식을 이용하여 최종 측정값의 산출하기전에 이러한 위치에서의 측정값들은 제외시켜야 한다. 잘못 설정된 작은 창은 그 수가 적으며 z_{ij} 값 역시 다른 값들에 비해 큰 차이를 보이므로 통계학적 방법을 이용하여 효과적으로 이러한 창들을 분리해 낼 수 있다. 먼저 선택된 10개의 작은 창들에서의 측정값으로 식(12)와 같은 평면의 방정식을 산출한다. 산출된 평면과 C_{ij} 와의 수직거리를 구하고 이를 h_{ij} 라 한다. 이 h_{ij} 값들의 분산을 구한 후 1σ 를 벗어나는 위치의 값들은 잘못 설정된 창으로 간주하고 제외시킨다. 이는 아래의 수식으로 표현된다.

$$\mu - \sigma \leq h_{ij} \leq \mu + \sigma \quad (13)$$

여기서 μ 는 h_{ij} 의 평균값이며 σ 는 분산을 의미한다.

최종 측정값은 나머지 C_{ij} 의 측정값들로 다시 평면맞춤을 수행한 후 산출한다.

4. 실험 및 토의

이상에서 기술된 측정알고리즘의 구현을 위해 Fig.12에서와 같은 측정시스템이 구성되었다. Fig.13은 실제 제작된 광학 프로브의 모습이다. Fig.14는 측정용 단계별로 본 모습이며, Fig.14(d)는 최종적으로 측정이 완료된 상태의 모습이다. 사진상에서 가운데에 위치한 사각형이 앞에서 언급한 큰 창(main window)이며 프로브의 위치에서 실시간으로 획득한 영상이다. 그 주위의 고정된 영상은 프로브가 측정위치로 이동하였을 때 얻어지는 초기 영상이다. Fig.15은 새도우 마스크의 이리 위치에서의 반복능 실험결과를 나타내고 있다. 실험결과 측정값의 최고 최소값이 10 μm 내에 들어오고 있음을 알 수 있다.



Fig.12 System configuration

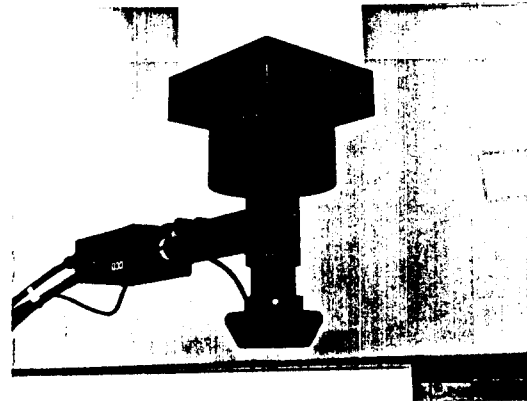
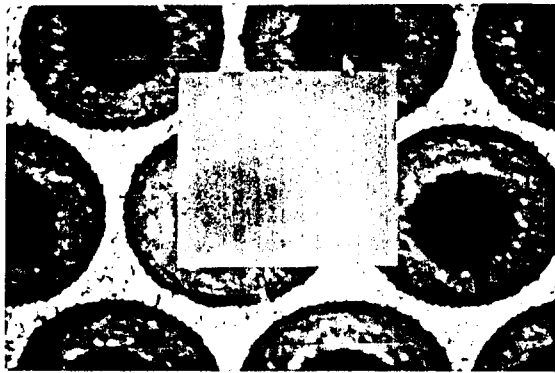


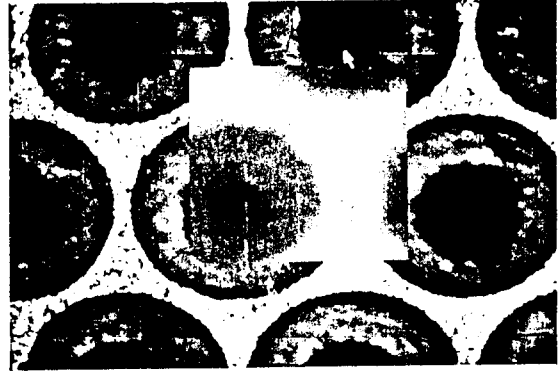
Fig.13 Optical microscope probe

5 결론

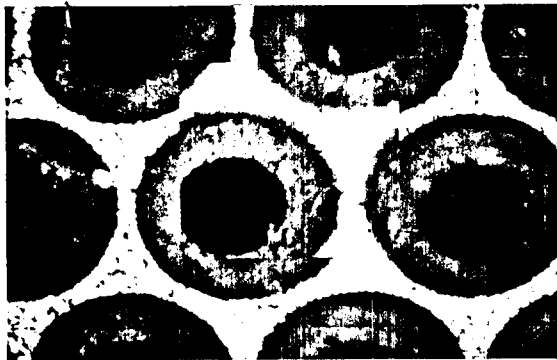
본 연구에서는 새도우 마스크의 3차원형상측정을 위해 영상 처리 기법을 이용한 자동 측정 알고리즘을 새로이 제안하고 광학현미경 시스템을 이용하여 10 μm 의 반복능을 갖는 시스템을 구현하였다. 그리고 기존 방식의 난점인 측정 좌표계 보정, 새도우 마스크의 변형 및 구멍으로 인한 문제점들을 해결하였다. 본 연구에서 제안된 측정방법은 일반적인 금형 및 가공물에 대해서도 적용될 수 있다.



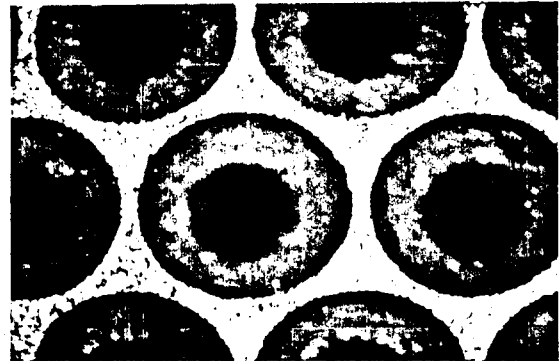
(a) Step1



(b) Step2



(c) Step3



(d) Step4

Fig.14 Step view of measurement

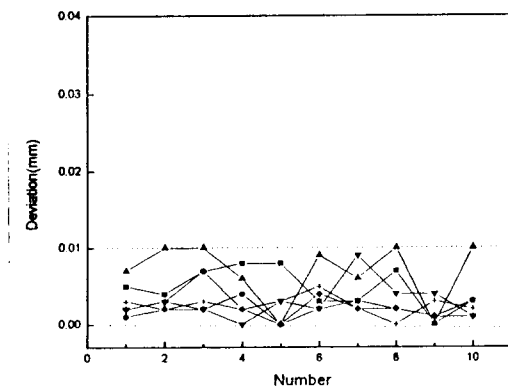


Fig.15 Repeatability test

참 고 문 헌

- (1) 이재윤, "추적식 3차원 형상측정용 위한 광학식 변위센서", KAIST, 석사논문, (1991)
- (2) Idesawa, M. Yatagai T. and Soma, T. 1997, "Scanning Moire Method and Automatic Measurement of 3-D Shapes", Appl. Opt., Vol. 16, pp.2152-2162
- (3) Kim, S. W. and Park, H. G., "Moire Topography by Slit Beam Scanning", Appl. Opt., Vol. 31, pp.6157-6161 (1992)
- (4) 박현구, 김승우, 박준호, "슬릿광 주사방법에 의한 자유곡면의 삼차원형상 측정", 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1202-1207, (1993)
- (5) Eric Krotkov, "Focusing", International Journal of Computer Vision, 1, pp.223-237, (1987)
- (6) J. M. Tenenbaum, "Accommodation in computer vision", Ph.D. Thesis, Stanford Univ., (1970)
- (7) Murali Subbarao, Tae Choi and Arman Nikzad, "Focusing techniques", Optical Engineering, Vol 32, No 11, pp.2824-2836, (1993)
- (8) T. S. R. Murthy, "A comparison of different algorithms for circularity evaluation", Precis. Eng., Vol 8, No 1, pp.19-23, (1986)