

광학현미경을 이용한 유연다공표면의 3차원 자유곡면 형상 측정시스템

박현구*, 김승우*

Three Dimensional Profile Measurement System for Flexible and Porous Sculptured Surfaces by Using Optical Microscope

Hyun-Goo PARK*, Seung-Woo Kim*

ABSTRACT

This paper describes a three dimensional profile measurement method for sheet metal products which have flexible and porous sculptured surfaces. Shadow masks are used as measuring objects for practical implementation of this study. The shadow masks are located inside the fluorescent glasses of monitors for televisions or computers and used to prevent electron guns from interfering between pixels. Three dimensional surface profiles are measured by adopting a software autofocusing technique to capture focused images. The experimental results show that the method is very effective and suitable for sheet metal products with flexible and porous surfaces.

Key Words : Shadow mask(새도우 마스크), Software autofocusing(수동형자동초점 맞춤), Image Processing(영상처리), Energy(에너지)

1. 서 론

생산공학 분야에서 삼차원형상을 측정하기 위하여 사용되고 있는 방법으로는 광삼각법⁽¹⁾, 모아레토포그래피^(2,3), 슬릿광형상측정법⁽⁴⁾ 그리고 접촉식프로브를 이용하는 삼차원형상측정법등 다양한 방법들이 있다. 이러한 방법들을 적용하여 측정해야할 대상은 매우 다양하고 측정방법들은 이러한 측정대상의 표면성질, 형상, 요구정확도 및 속도 등의 요구조건에 따라 선택될 수 있다. 본 연구에서 측정하고자 하는 대상은 유연다공표면을 갖는 물체로 미세한 접촉력에 의해서도 변형이 발생하기 쉬우며 표면에

매우 미세한 구멍들이 많은 특성을 가지고 있다. 대표적인 예가 TV 브라운관에 사용되는 새도우마스크이다. 새도우마스크(shadow mask)는 텔레비전이나 컴퓨터 모니터의 브라운관내에 설치되는 얇은 금속 박판으로 전자총에서 방사되는 전자빔을 일정한 곳으로만 통과시키므로써 화소사이에 간섭을 방지하기 위한 부품이다. 새도우마스크의 표면에는 원형 또는 슬롯모양의 두 종류의 구멍이 있으며, 새도우마스크의 곡률 방정식은 4차 이상의 다항식으로 표현이 가능하다. Fig.1은 본 연구에서 사용한 측정대상인 15" 새도우마스크와 현미경프로브를 이용하여 획득한 새도우마스크의 표면의 영상을 보여준다. 새도우

* 한국과학기술원 기계공학과

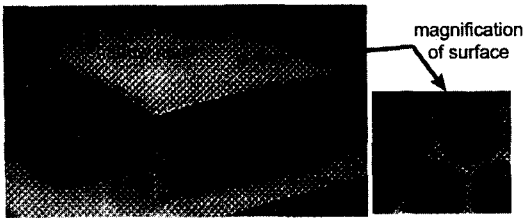


Fig. 1 Shadow mask and captured image

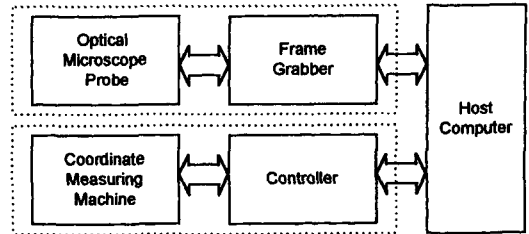


Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

가스크의 생산공정과 측정목적은 다음과 같다. 에칭공정을 통하여 금속 박판에 구멍을 가공하고 프레스를 이용하여 최종적으로 새도우마스크를 만든다. 이때 새도우마스크의 금형은 프레스 가공 후 탄성변형으로 일어나는 탄성복원효과를 고려하기 위하여 실제 새도우마스크의 설계 광정식과는 다르게 가공된다. 하지만 금형 설계에 있어서 이러한 탄성복원 효과를 이론적으로 정확하게 해석하여 반영한다는 것은 불가능하다. 실제 생산되어 나온 새도우가스크의 측정된 형상데이터를 근거로 하여 금형을 수정한다. 따라서 새도우마스크의 3차원 곡률 형상을 정확히 측정할 수 있는 기술이 요구된다.

현재, 새도우마스크를 측정하기 위하여 가장 많이 이용하는 방법으로는 접촉식프로브를 이용한 측정방법과 레이저를 이용한 비접촉식 측정방법이 있다. 그러나 새도우마스크는 미소한 힘에도 쉽게 변형하는 특성을 가지고 있어 접촉식프로브의 사용이 곤란하다. 레이저 빔을 이용한 비접촉식 방법의 경우에는 광삼각법을 이용하는데 새도우마스크상의 있는 구멍으로 인하여 측정정확도가 떨어지게 된다.

본 연구에서는 앞서 언급된 방법들의 문제점을 극복할 수 있는 비접촉식측정방법을 도입하고 이를 구현하는 측정 알고리즘을 개발하였다. 이 방법은 광학현미경을 삼차원측정기에 장착하고 자동초점맞춤방식을 이용하여 측정물의 3차원형상을 측정하는 방법이다.

2. 측정원리

2.1 측정시스템의 구성

Fig.2는 측정시스템의 개략도를 보여주며 크게 3차원 측정기, 광학현미경 그리고 영상처리시스템으로 구성된다. 3차원측정기는 RS-232C통신을 이용하여 제어되고 3차원측정기의 분해능은 1 μ m이고 위치정도는 약 $\pm 3\mu$ m 정도이다. 광학현미경의 영상은 영상처리보드를 통하여

획득되어 영상처리 알고리즘에 의하여 처리된다. 광학현미경을 이용하여 얻어지는 측정물의 영상의 선명성의 조명조건과 대물렌즈의 성능에 주로 좌우된다. 일반적으로 광학현미경을 위해서 사용되는 조명의 종류에는 동축조명(co-axial illumination), 나선조명(ring illumination) 그리고 배사조명(back illumination)이 있다. 동축조명만을 이용할 경우에는 곡률이 작은 가장자리부근에서 CCD카메라에 집광되는 광량이 줄어들게 되므로 측정물의 선명한 영상을 얻는 것이 힘들다. 본 연구에서는 조명방식으로 동축조명과 동축조명의 문제점을 보완하기 위하여 나선조명을 채택하였다. 나선조명의 광원으로는 붉은 색의 발광 다이오드를 사용하였다. 측정물의 영상은 CCD카메라를 이용하여 획득된다. 현미경의 수평분해능은 약 1.153 μ m이다.

2-2 측정원리

광학현미경은 일반적으로 미세한 2차원영상을 얻기 위해 사용된다. 2차원영상을 선명하게 얻기 위해서 이송기구를 이용하여 광학현미경을 상하로 이동시키면서 초점을 맞춘다^(5,6,7). 이러한 상하이송축에 위치감지센서를 장착하여 초점이 맺혔을 경우에 센서의 위치를 읽으면 측정점의 상대적인 3차원 높이좌표를 얻을 수 있다. 초점을 맞추기 위한 방식으로는 크게 수동방식(manual type)과 자동방식(automatic type)이 있다. 자동방식은 수동형(passive type)과 능동형(active type)으로 구별된다. 능동형은 초점 맞추기를 위한 전용시스템을 현미경에 장착하여 측정물체와 광학현미경사이의 거리를 직접적으로 측정하여 초점위치를 맞추는 방식이다. 여기에 사용되는 거리측정방식으로는 광삼각법⁽¹⁾등 다양한 방법이 있다. 이러한 방법은 초점을 맞추는 속도가 매우 빠르지만 본 연구의 대상으로 사용되는 다공질유연물체에는 부적합하다. 수동형은 초점을 맞추기 위한 부가적인 시스템을 사용하지 않고 단순히 얻어진 영상으로부터 초점에 관한

정보 즉 에너지를 산출하여 이를 초점맞춤에 적용한다. 그리고 광학현미경으로 얻어진 하나의 2차원영상에는 초점을 맞추기 위한 3차원정보가 포함되어 있지 않으므로 여러개의 영상이 필요하다. 따라서 광학현미경을 상하로 이동하면서 여러 개의 영상을 획득하고 각 영상들의 에너지를 계산하여 에너지가 최대인 위치를 산출한다. 이 위치의 삼차원좌표가 측정점의 좌표가 되고 그 위치로 광학현미경을 이동시켜 초점을 맞추게 된다. Fig.3은 광학현미경을 이용한 세부측정원리를 보여준다. 먼저 프로브를

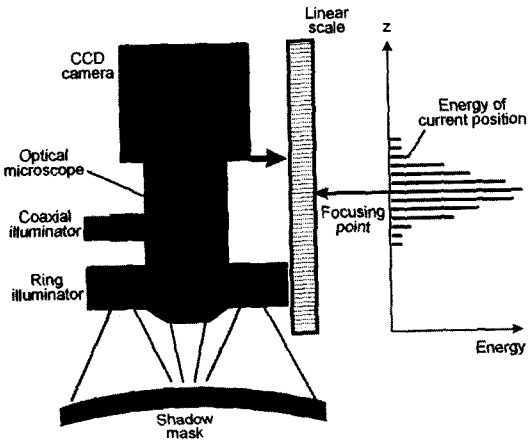


Fig. 3 Basic principle of software auto-focusing

측정할 새도우마스크의 설계방정식으로부터 측정을 시작하기 위한 위치를 추정하여 이동한다. 이 위치에서 프로브가 한정된 범위를 일정한 간격으로 움직이면서 영상을 획득하고 영상치리를 통하여 에너지를 계산한다. 여기서 에너지는 영상의 흐려짐과 선명성을 판단하는 근거로 일반적으로 영상에 포함되어 있는 고주파성분의 합이 정량적인 값으로 정의된다. 이와 같은 과정에서 얻어진 광학현미경의 위치와 에너지는 Fig.4와 같이 얻어지고 에너지가 최대인 위치가 측정 점의 높이가 된다. 그리고 더욱더 정확한 측정 점의 높이를 산출하기 위하여 일정간격으로 얻어진 에너지의 이산분포(discrete distribution)를 연속함수로 곡선맞춤을 한 후 에너지가 최대인 위치를 산술적으로 찾는다. 앞서 언급한 측정방법은 측정점이 측정표면에 위치할 경우이다. 측정점이 새도우마스크상의 구멍에 위치할 경우에는 영상 내에서 구멍 주변의 여러 위치에서 3차원좌표들을 측정한 후 형상맞춤방식에 의해 측정점의 3차원좌표를 산출한다.

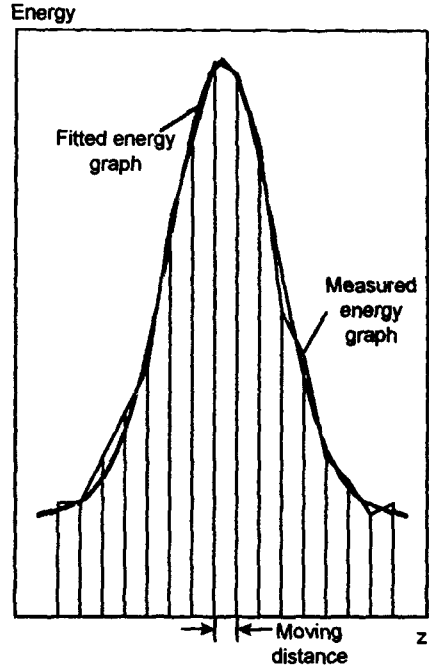


Fig. 4 Energy graph with Gaussian distribution

2-3 에너지(energy)

카메라를 이용하여 획득된 영상에서 고주파성분의 포함 정도의 정량적인 값을 에너지라고 정의한다. 에너지를 계산하는 방법⁽⁶⁾으로는 푸리에변환법(Fourier transformation), 농도의 기울기 변환법(gradient magnitude maximization), 고주파필터이용법(high pass filtering), 히스토그램이용법, 농도분산이용법, 농도차이용법(sum-modulus difference) 및 패턴인식법(pattern recognition)등이 있다. 이러한 에너지함수들로 만들어지는 에너지곡선의 형태는 일반적으로 정규분포곡선의 형태를 갖는다. 자동초점알고리즘에 이용되는 에너지함수는 에너지곡선이 외란에 영향을 받지 않아야 한다. 본 연구에서는 효율적인 에너지 산출을 위하여 2가지 연산자 SMD와 소벨연산자를 이용한다.

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

CCD카메라로부터 획득한 영상정보에서 이웃한 화소사이의 농도 차이를 이용하는 방법으로 에너지는 다음 식에 의해 얻어진다.

$$E = E_x + E_y \tag{1}$$

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

$$E_y = \sum_x \sum_y |I(x,y) - I(x,y-1)| \quad (3)$$

여기서, (x,y) 는 영상좌표계이고 $I(x,y)$ 는 영상점 (x,y) 에 서의 농도(gray value)이다.

2-3-2 소벨 연산자

영상내에 포함된 각종 경계(edge)는 초점이 맺힌 정도 를 가름하는 중요한 요소이다. 영상내에서 경계는 고주파 성분으로 표현된다. 그러므로 초점이 정확히 맺힐수록 에 너지는 이러한 고주파성분으로 인하여 증가하게 된다. 새 도우마스크의 경우에는 가공된 구멍의 경계와 표면의 미 서한 요철 등이 이러한 고주파성분을 가진다. 소벨연산자 는 영상내의 임의의 점에서 농도기울기 $\nabla I(x,y)$ 를 계산 하는 연산자로 영상내의 경계를 확대하는 효과를 있다. 본 연구에서는 아래와 같은 소벨연산자를 이용하여 에너 지 변화의 민감성을 증대시켰다.

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

위의 연산자를 이용한 에너지는 다음과 같은 방식으로 산출한다.

$$E = \sum_x \sum_y S(x,y)^2, \quad S(x,y) > T \quad (5)$$

여기서, $S(x,y) = \sqrt{[i_x * I(x,y)]^2 + [i_y * I(x,y)]^2}$ 는 영상점 (x,y) 에서 농도기울기의 합을 의미하고 세부적 으로 $i_x * I(x,y)$ 와 $i_y * I(x,y)$ 는 각각 x, y 축 방향으로 농도기울기이다. T 는 일정한 값 이상의 농도기울기를 취하기 위한 임계값(threshold value)이다

3 측정 알고리즘

측정알고리즘은 크게 측정 좌표계 보정 알고리즘과 자 동 측정 알고리즘으로 구성된다.

3-1 좌표계 보정

측정물을 3차원 측정기에 설치하였을 때 측정기의 기계 좌표계(machine coordinate)와 측정물의 물체 좌표계(object coordinate)를 일치시킬 수 없으므로 기계 좌표 계를 물체 좌표계로 변환시키는 좌표계 변환 알고리즘이 필요하다. 새도우마스크 측정은 새도우마스크상의 좌표 계를 따라 수행되어야 한다. Fig.5는 새도우마스크의 좌 표계 변환을 위한 기준점들의 위치를 보여준다. 그림에서 (x, y, z) 는 새도우마스크의 물체좌표계를 나타내며 (x', y', z') 는 3차원측정기의 기계좌표계를 나타낸다. 물체좌표계의 x 축은 새도우마스크의 장축으로 설정된다. 이러한 기 준점은 일반적으로 새도우마스크의 종류에 따라 원과 슬롯의 중심으로 정의된다. 슬롯형에는 슬롯이 한 개만 새 겨져 있는 것과 2개가 나란히 새겨져 있는 것이 있다. 본 연구에서 측정된 15"새도우마스크의 기준점은 기준원의 중심좌표이다. 이러한 기준점은 Fig.5에서 R_1, R_2, R_3 그리고 R_4 와 같이 새도우마스크린상에 4개가 있다. 좌표 계보정은 다음과 같은 순서로 수행된다. 먼저 기준점 $R1$ 과 $R3$ 의 중심점의 위치를 측정한 후 이 두 중심을 잇는 축을 x 축으로 설정한다. 이때 중심점은 기준원의 원주상 의 8개의 위치를 측정한 후 다음과 같이 최소자승법을 이 용하여 구한다.

$$XU = Y \quad (6)$$

여기서,

$$X = \begin{pmatrix} \sum (x_i^2 + y_i^2)^2 & \sum x_i(x_i^2 + y_i^2) & \sum y_i(x_i^2 + y_i^2) \\ \sum x_i(x_i^2 + y_i^2)^2 & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i \\ \sum y_i(x_i^2 + y_i^2)^2 & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 \end{pmatrix},$$

$$U = [A \ u \ v]^T,$$

$$Y = [\sum (x_i^2 + y_i^2)^2 \ \sum x_i \ \sum y_i]^T$$

이고, (x_i, y_i) 측정점의 위치이며 A, u, v 는 상수로 다음 수식에 의해 얻어진다.

$$U = X^{-1}Y \quad (7)$$

이들로부터 원의 중심 (x_r, y_r) 과 반경 R 은 아래의 수식에서 산출된다.

$$x_r = -\frac{u}{2A} \quad (8)$$

$$y_r = -\frac{v}{2A} \quad (9)$$

$$R = \sqrt{x_r^2 + y_r^2} + \frac{1}{A} \quad (10)$$

물체 좌표계의 원점은 위에서 구한 기준점간의 중심으로 설정한다. 새도우마스크가 측정지그에 설치되었을 때 지그 높이 차에 의한 새도우마스크의 뒤틀림을 방지하기 위해 지그 보정을 수행한다. Fig.5의 $P_1 - P_4$ 는 지그 보정을 위하여 측정되는 기준 점의 위치를 나타내며 이는 새도우마스크의 측정위치중 원점에서 가장 멀리 떨어져 있는 4개의 대칭점으로 설정한다. 이점들을 반복측정하여 상대 높이차가 20 μ m이하가 되도록 지그를 조정한다. 지그 보정이 완료된 후 이 4점으로 면보정을 수행한다. 면보정이 완료되면 지그의 조정으로 인하여 기준점들의 위치가 변하게 되므로 위에서 언급한 측 및 원점보정을 다시 한번 수행한다.

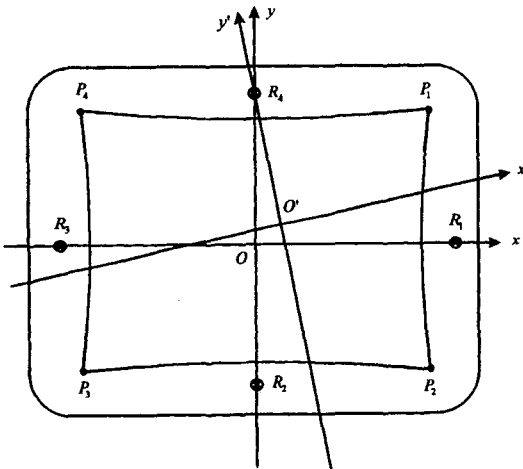


Fig. 5 Coordinate systems on shadow mask

만 너무 작을 경우에는 외란으로 인하여 잘못된 에너지를 얻을 확률이 높아지므로 불안정한 에너지 곡선을 얻게 된다. 반면에 창 크기가 지나치게 크면 측정된 높이 값은 일정한 면적내의 평균 높이 값이 되므로 측정정도에 영향을 준다. 따라서 측정할 새도우마스크 종류 및 프로브의 배율에 따라 창 크기를 조절하여야 한다. 새도우마스크 측정에 있어서 최소한의 창 크기는 어떠한 경우라도 측정을 할 수 있기 위해서는 표면에 나있는 구멍을 완전히 포함하는 크기여야 한다. 그러나 이러한 창으로 초점 맞추기를 수행하면 앞에서 언급한 측정정도가 떨어지게 되므로 이를 보완하기 위해서 Fig.6에서와 같이 큰 창(main window)을 일정한 등간격의 작은 창(sub-window)으로 분할하여 측정을 수행한다. 이러한 작은 창들 중에서 구멍에 속하지 않는 작은 창들의 초점위치로부터 측정점의 높이를 산출한다. 본 연구에 있어서 큰 창은 217*217, 작은 창은 31*31화소를 이용하였다.

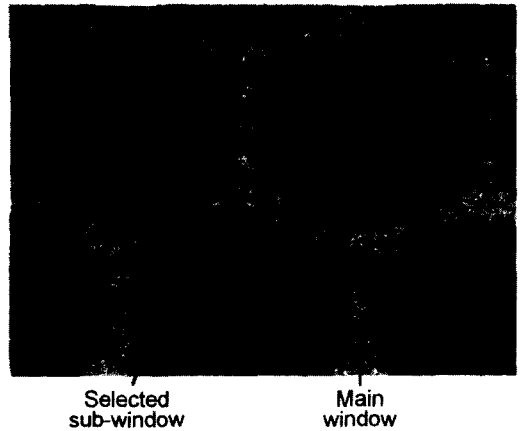


Fig. 6 Selection method of sub-windows for autofocusing

3-2 창(window)

창(window)이란 임의의 한 위치를 측정하고자 할 때 이용하는 한 영상에서 에너지를 계산하기 위하여 사용되는 면적을 의미한다. 측정점의 3차원좌표를 측정하기 위한 이상적인 경우에는 영상의 한 화소에서의 농도정보만 가지고 초점을 맞추어야 한다. 그러나 실제로는 한 화소에서의 정보만 가지고는 초점의 판단이 불가능하므로 이웃한 화소의 농도를 함께 이용하여야 하므로 유한한 화소수를 갖는 사각면적이 필요하게 된다. 이러한 면적을 창이라고 정의 한다. 창 크기는 가능하면 작은 것이 좋지

3-3 측정 알고리즘

광학현미경을 이용한 비접촉식 측정에 있어서 측정이 효율적으로 수행되기 위해서는 프로브가 측정위치로 이동하였을 때 초기위치가 초점위치 근처이어야 한다. 측정 초기위치는 새도우마스크의 설계방정식을 근거로 추정한다. 이러한 설계방정식은 새도우마스크 안쪽 면에 대한 설계값으로 새도우마스크의 국부적인 변형과 지그높이차로 인하여 실제 초점위치와 차이가 나므로 프로브가 측정위치로 이동하였을 때 초점위치에서 벗어난 정도를 예측하는 것이 힘들다. 따라서 초점의 위치를 대략적으로 산

출한 후 정밀한 초점 맞추는 2단계 초점맞추기를 수행하여 측정시간을 단축한다.

SMD는 알고리즘의 구현이 간단하며 계산속도가 빠르므로 대략적인 초점위치를 산출하는데 이용한다. 소벨연산자는 각종 외란에 강하고 프로브가 미세한 범위 내에서 움직이더라도 에너지변화가 크므로 정확한 초점위치를 산출하는데 이용한다. 각 단계에서 얻어지는 에너지곡선의 형태는 Fig.7(a), (b)와 같다. 대략적인 초점위치를 산출하기 위해서 Fig.7(a)에서처럼 먼저 초기위치 S에서 z축으로 1.0mm를 이동한 후 0.2mm간격으로 이동하면서 큰 창을 에너지를 계산한다. 에너지가 최고가 되는 점에서부터 2점을 더 측정한 후 이들 값들로 곡선맞춤을 수행하여 초점위치 z'_j 를 산출한다. 이때 에너지곡선은 다음식과 같이 2차 곡선으로 단순화하여 곡선맞춤을 수행한다.

$$E = az^2 + bz + c \quad (11)$$

에너지와 z값 사이에는 숫자의 크기차로 인해 (11)식을 직접 이용하면 연산오차로 인해 위치산출에 커다란 오차가 발생할 가능성이 있으므로 측정값을 정규화한 후 곡선맞춤을 수행한다. 이러한 정규화는 아래 수식에서처럼 단순한 과정을 통해 구현하였다.

$$z_n = Cz \quad (12)$$

(12)식에서 C는 임의의 상수이며 이는 실험적 방법을 통해 결정한다. 식(11)은 다시 정리하면 다음과 같다.

$$E = a'z_n^2 + b'z_n + c' \quad (13)$$

식 (13)에서 상수 a', b', c' 를 최소자승법을 이용하여 구한 후 초점위치를 산출한다. 1차 초점 맞추기로 대략적인 초점위치를 산출한 후 작은 창을 이용하여 정밀한 초점 맞추기를 수행한다. 1차 초점 맞추기를 수행한 후 획득한 영상내의 작은 창들에 대하여 SMD를 이용하여 에너지를 계산하며, 이중 에너지가 큰 10개를 2차 초점 맞추기에 이용하는 작은 창으로 설정한다. Fig6은 2차 초점맞추기를 위하여 선택된 작은 창들의 예를 보여주며 C_{ij} 로 표현한다. 앞서 산출한 z'_j 에서 z축으로 0.2mm를 이동한 후 $40\mu\text{m}$ 간격으로 이동하면서 각각의 C_{ij} 에 대하여 소벨 연산자를 이용한 에너지 곡선을 보여준다. 각각의 C_{ij} 에서

의 초점위치값은 앞서 언급한 1차 초점 맞추기와 동일한 방법으로 산출할 수 있으며 초점위치값은 z_{ij} 로 표현한다. 큰 창내의 새도우마스크의 면은 그 크기가 곡률에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작으므로 아래 수식에서처럼 1차 평면으로 가정한다.

$$Ax_n + By_n + z_n + D = 0 \quad (14)$$

식(14)에서 x_n, y_n 은 C_{ij} 의 위치좌표이며 Z_n 은 Z_{ij} 이고 앞에서와 마찬가지로 정규화된다. 각 상수는 최소자승법을 이용하여 산출한다. C_{ij} 를 설정할 때 새도우마스크의 가장자리 부근에서는 구멍의 경사진 면에서의 반사광이 표면에서의 반사광보다 상대적으로 밝아서 잘못된 창을 설정할 수 있다. 따라서 (14)식을 이용하여 최종 측정값을 산출하기 전에 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 분리해낼 수 있다. 먼저 선택된 10개의 작은 창들에서의 측정값으로 식 (14)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.

$$\mu - \sigma \leq h_{ij} \leq \mu + \sigma \quad (15)$$

여기서 μ 는 h_{ij} 의 평균값이며 σ 는 분산을 의미한다. 최종 측정값은 나머지 C_{ij} 의 측정값들로 다시 평면맞춤을 수행한 후 산출한다.

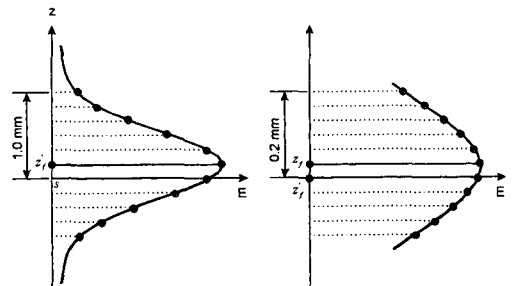


Fig. 7 Energy graph for dual auto-focusing

4. 실험 및 토의

이상에서 기술된 측정알고리즘의 구현을 위해 Fig.8(a)에서와 같은 측정시스템이 구성되었다. Fig.8(b)는 설계제작된 광학프로브의 모습이다. Fig.9는 측정을 단계별로 본 영상들이다. 사진 상에서 가운데에 위치한 사각형이 앞에서 언급한 큰 창(main window)이며 프로브의 위치에서 실시간으로 획득한 영상이다. 그 주위의 수정된 영상은 프로브가 측정위치로 이동하였을 때 얻어지는 초기 영상이다. Fig.10은 본 연구에서 제안 방법으로 측정된 새도우마스크의 3차원형상을 보여준다. 그리고 반복능을 평가하기 위하여 측정프로브를 측정면상의 한 곳에 위치시킨 후 측정을 30회를 반복하여 표면의 높이를 측정을 하였다. 측정은 측정위치를 대략적으로 찾은 후 세밀한 자동초점맞춤을 하는 2단계 자동초점맞춤방법을 사용하여 수행되었다. Fig.11은 반복능의 평가결과를 보여주고 있다. 이 결과에서 측정값의 최대편차 즉 한점에서의 반복능이 8 μ m 이내임을 알 수 있다.

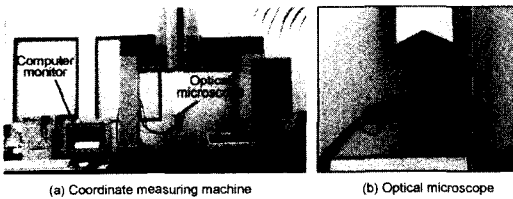


Fig. 8 Measurement system

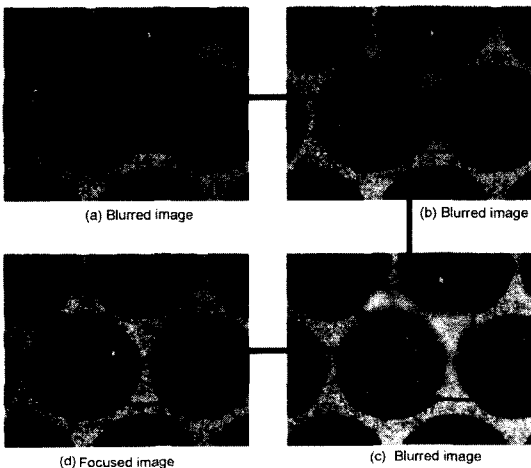


Fig. 9 Captured images according to probe positions

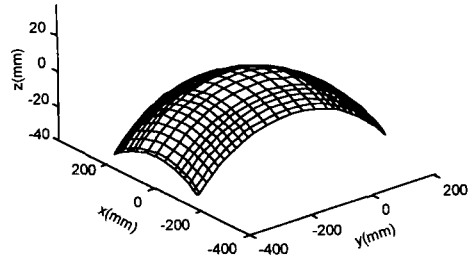


Fig. 10 Measured 3D Profile

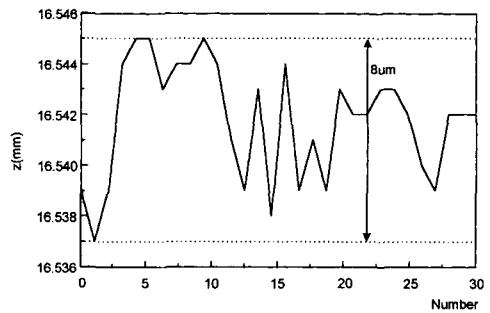


Fig. 11 Repeatability of measurement system

5.결 론

본 연구에서는 새도우마스크의 3차원 형상측정을 위해 영상처리 기법을 이용한 자동 측정 알고리즘을 새로이 제안하고 광학현미경 시스템을 이용하여 8 μ m의 반복능을 갖는 시스템을 구현하였다. 그리고 기존 방식의 난점인 측정 좌표계 보정, 새도우마스크의 변형 및 구멍으로 인한 문제점들을 해결하였다. 또한, 본 연구에서 제안된 측정방법은 일반적인 금형 및 가공물에 대해서도 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. 이재운, "추적식 3차원 형상측정을 위한 광학적 변위 센서", KAIST, 석사논문, 1991.
2. M. Idesawa, T. Yatagai and T. Soma, "Scanning Moire Method and Automatic Measurement of 3-D Shapes", Appl. Opt., Vol.16, pp.2152-2162, 1973.
3. S.W. Kim and H. G. Park, "Moire Topography by Slit Beam Scanning", Appl. Opt.,

- Vol.31, pp.6157-6161, 1992.
4. 박현구, 김승우, 박준호, "슬릿광주사법에 의한 자유곡면의 삼차원형상 측정", 대 한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp.1202-1207, 1993.
 5. E. Krotknoy, "Focusing", International Journal of Computer Vision, Vol.1, pp.223-237, 1987.
 6. J.M.Tenebaum, "Accommodation in Computer Vision", Ph. D. Thesis, Stanford Univ., 1970.
 7. S. Murali, C. Tae and N. Arman, "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.