

소형(1mm이하) hole의 형태 및 크기 측정을 위한 자동초점 비전검사기

한문용*, 한현수*

Automatic Focusing Vision System for Inspection of Size and Shape of Small Hole

Moon-Yong Han*, HERNSEO HAHN*

ABSTRACT

Since the quality of the coated wires is in various applications dependant on the coating depth, accuracy of hole size of dies used for coating wires must be maintained precisely, in general within one micron. This paper proposes a new vision system which measures automatically the size and shape of small holes having diameters less than 1mm within an error limit of 1 micron. To quickly obtain the focused image, this paper proposes an estimation method of the camera position using only a couple of defocused hole images. It measures the distributions of light intensity around the image boundary and decides the direction and distance of a camera motion. The proposed system measures the size, shape distortion, inclination of the hole against the axis of the dies structure, to decides the acceptability of the dies for use. The proposed algorithm has been implemented using a cheap 640×480 image system and has shown an average size error of 1micron when measuring the dieses having 0.1mm to 1.0mm diameters. It can be applied to the inspection of the size and position of holes in PCB, too.

Key Words : Visual Inspection(비전 검사), Coating Dies(코팅 다이스), Hole Shape Measurement(홀 형상 측정)

1. 서론

전선은 동선의 두께뿐 아니라 코팅의 두께도 도전에 상당한 영향을 주므로 코팅의 두께를 오차 없이 조절하는 것은 매우 중요한 과제이다. 특히 미세한 지름(1mm이하)의 동선을 30micron 정도의 두께로 coating하는 경우 coating의 정확도는 전적으로 dies의 정확도에 의존할 수 밖에 없다. 실제로

미세한 동선을 이용하여 생산되는 모니터는 coating의 정밀도에 따라 diffraction yaw가 수 픽셀에 이르는 오차를 갖게 된다.

지금까지 생산현장에서 사용하는 dies의 검사방법은 규격 전선을 통과시키는 방법과 dies의 외경을 전자현미경을 통해 육안 검사하는 방법^[1], 그리고 광센서를 이용하여 dies hole에 빛을 통과시키고 반대편에 투과되는 광량을 측정하는 방법^[2]이 주

* 송실대학교 정보통신전자공학부

종을 이루고 있다. 전자현미경을 이용한 검사기는 전선이 통과되어 나오는 dies 최종 면의 영상을 획득하여 그 크기만을 측정하고 있다. 투과 광량을 측정하는 방법은 전체적인 빛의 투과량만을 참고하므로 hole의 형태의 변화에 따른 변형도는 정밀하게 측정하지 못하는 문제가 있다. 실제로 사용되는 dies는 길이가 1mm 정도의 전선유도관으로 외부의 보조 구조물에 삽입되어 사용이 편리하도록 제작되고 있다, 따라서 유도관과 구조물의 축이 일치하지 않으면 전선이 실제로 통과하는 통로에 변형이 발생하므로 coating 두께에 상당한 오차를 발생할 수 있어서 구조물에서의 유도관의 기울기 여부도 검사해야하나 아직까지 이러한 검사가 이루어지지 못하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 coating dies의 hole 크기뿐 아니라 hole 내부에 발생한 변형도, 그리고 유도관 축과의 일치성을 자동으로 검사하는 비전시스템을 제안하고 구현한다. 비전검사에 있어서 가장 중요한 문제는 카메라 초점의 자동조절방법이다. 자동초점 조절 방법은 응용분야에 따라 다양한 방법들이 사용되고 있다. Feddema와 Simon^[3]의 경우는 측정대상에 대한 CAD 정보를 가지고 있을 경우, 모델에 대한 CAD 정보에서 이상적인 밝기 분포도를 생성한 후 측정하여 획득한 영상의 밝기 분포도와 상관함수를 구하여 초점을 조절하는 방법을 사용하고 있다. Yoda et al.^[4]는 wafer 검사기에 사용하는 카메라의 초점을 조절하기 위해 외부에서 pulse 형태의 바람을 wafer에 쏘고 렌즈에 돌아오는 공기압력을 측정하는 방법을 사용하였다. Feddema방법의 경우는 CAD정보와 다른 물체에 대한 초점조절이 어렵고 Yoda의 방법은 물체가 소형이고 크기가 바뀌는 경우 적용이 어렵다는 문제를 갖는다. 이런 문제를 없애기 위해 영상의 자체정보를 이용한 방법이 사용되기도 한다. 예를 들면, 에지검출 연산자를 이용하여 에지 영역을 추출하고 에지 영역에서의 밝기 분포도의 기울기를 최대로 만드는 위치를 초점위치로 정하는 방법이다^[5,6]. 하지만 이러한 방법은 조명의 영향을 크게 받으며 초점영상의 획득을 위해 여러 차례의 보조영상을 분석해야하는 문제를 안고 있다.

제안하는 측정시스템은 비전서보제어를 통해 측정대상물체를 카메라의 측정위치에 이동한 후, 초점거리를 중심으로 얻어진 두 개의 영상의 밝기

분포를 이용하여 초점영상의 획득을 위한 카메라의 측정위치를 결정하여 신속하게 초점영상을 자동으로 얻을 수 있다. 얻어진 초점영상에서 면적비교방법을 이용하여 hole의 평균크기를 결정하고, hole에 이물질이 끼어있거나 hole이 달아서 변형된 정도를 측정하며, 영상의 그림자 분석을 통해 전선 유도관과 외형구조물 사이의 축의 기울어짐 등을 측정한다. 본 논문에서 제안한 검사방법은 0.1mm에서 1.0mm의 크기를 갖는 hole에 적용하여 실험하였으며 저가로 구입이 가능한 640x480화소의 카메라 및 영상보드를 이용하여 평균 1micron이하의 오차 범위에서 검사가 가능함을 보였다.

2. 자동 초점영상 획득을 위한 비전시스템

광학적인 측정방법은 초점의 정확도 판단에 따라 측정영상의 크기가 변하게 된다. 예를 들어 렌즈의 수차가 0.42, 굴절률이 1.5, 빛의 파장이 0.6micron이고 배율이 7이면 물체가 렌즈축을 따라 초점거리에서 0.11micron만 이동하여도 영상은 1.8micron 차이를 보여준다.^[7] 따라서 형태뿐 아니라 위치, 크기 등을 측정하려는 고속 검사용 비전시스템은 피측정물체의 초점영상을 신속하게 획득할 수 있도록 측정위치를 결정해야한다.

본 논문에서는 영상의 초점을 정확하게 조절하기 위해 hole 영상의 밝기 분포를 이용한 비전서보제어를 통해 측정대상물체(dies hole)의 중심을 카메라의 광학축 상에 이동한 후, 임의의 위치에서 획득한 두 개의 보조영상의 밝기 분포를 해석하여 초점영상의 측정위치를 결정하는 시스템을 구성한다. 제안하는 시스템의 자동초점 조절시스템은 그림 1과 같이 구성된다.

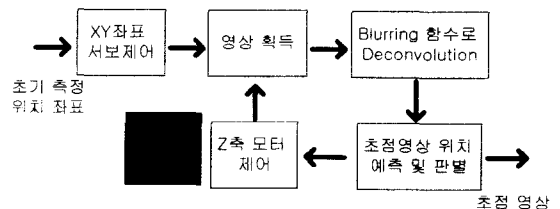


Fig. 1 Block diagram of the automatic focusing system.

2.1 Dies의 XY위치제어

측정대상물체를 카메라의 측정 가능 위치로 이동하기 위해서 비전시보방법을 사용한다. 카메라가 dies hole의 위치로 이동할 때 다양한 원인에 의해 정확한 위치로의 이동이 불가능하며 그림 2의 좌측 하단 영상과 같이 hole의 일부만이 카메라의 측정 범위에 위치하게 된다. 이 경우 측정위치 내의 부분적인 hole의 중심을 계산하고 카메라의 광학축과 일치선상에 놓이는 CCD의 중앙(C_x, C_y)으로 이동시킨다. (X, Y)_{new}를 서보제어기의 입력이라 하면 그 값들은 다음의 식 (1)과 (2)에 의해 결정된다. 식에서 n은 영상 내의 화소들 중에서 밝기가 임의의 임계값 t보다 큰 화소들의 수를 나타내고 (X_o, Y_o)는 이들 화소의 중심을 나타낸다.

$$(X_o, Y_o) = \left(\frac{1}{n} \sum_{k(x,y) \geq t} x, \frac{1}{n} \sum_{k(x,y) \geq t} y \right) \quad (1)$$

$$(X, Y)_{new} = (C_x - X_o, C_y - Y_o) \quad (2)$$

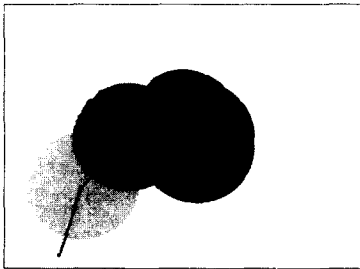


Fig. 2 An example of XY position control using the visual servo control.

그림 2는 위의 식을 이용하여 카메라의 측정범위에 부분적으로 위치하는 hole 영상을 광학축에 일치시키는 궤적을 보여준다. 자동으로 hole의 중앙과 CCD의 중심을 일치시킴으로써 초기화 작업을 없앨 수 있다.

2.2 초점영상

카메라로 hole의 크기를 측정하는 원리는 그림 3과 같다. 렌즈를 중심으로 i만큼 떨어진 위치에 CCD가 고정되는 경우 초점영상을 얻기 위해서는 hole은 렌즈의 반대편에 o만큼 떨어진 위치에 있어야 한다. CCD를 영상평면, hole의 위치를 물체평면이라 부른다. 물체평면의 위치가 렌즈쪽으로 δ_2 만큼 이동하면 초점영상의 위치는 영상평면의 오른쪽

으로 멀어지게 되고 따라서 영상평면에는 원래의 영상보다 크고 τ_2 만큼 blurring된 영상이 얻어진다. 반대로 물체평면의 위치가 렌즈에서 δ_1 만큼 멀어지면 초점영상의 위치는 영상평면의 앞쪽으로 가까워지고 따라서 영상평면에는 원래의 영상과 크기는 같지만 τ_1 만큼 blurring된 영상이 얻어진다.

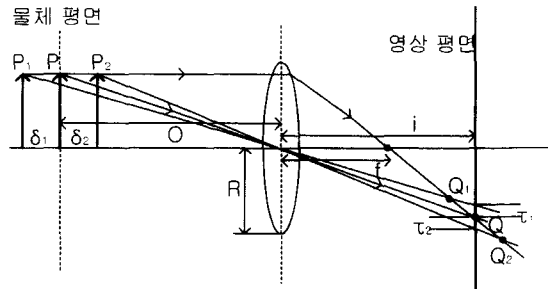


Fig. 3 Blurring effect on the image plane by moving the object plane around the focused image position.

그림 3에서 알 수 있듯이 물체평면이 초점영상을 만드는 위치에서 렌즈로부터 멀어지면 τ_2 값이 커지게 되고 렌즈에 가까워지면 τ_1 이 커져 blurring 효과가 모두 커지게 된다. 실제로 영상평면이 초점영상의 위치에 놓이더라도 초점영상이 그림 4(a)와 같이 경계점에서 $\tau = \infty$ 계단함수 형태의 밝기분포를 갖지 못한다. 이는 렌즈가 가지는 왜곡에 의해 발생하는 현상으로 그림 4(b)는 물체평면이 렌즈에 가까워질 때 τ_1 의 변화를 그림 4(c)는 물체평면이 렌즈에서 멀어질 때 τ_2 의 변화를 보여준다. 그림 4는 blurring된 영상이 연속해서 얻어지면 물체평면이 초점영상을 이루는 위치에서 렌즈를 기준으로 어느 방향에 놓였는지를 판단하게 해준다. 이는 연속적으로 획득한 영상의 blurring 영역을 비교하여 그림 4(b)와 같이 상승점이 고정이면 δ_1 방향이고 하강점이 고정이면 δ_2 방향임을 알 수 있다.

초점영상을 결정하는 기존의 방법은 blurring된 영상, $I_b(x, y)$ 는 초점영상을 $I_f(x, y)$ 가 blurring 함수, $h(x, y)$ 와의 convolution에 의해 얻어진 것으로 해석하고 $I_b(x, y)$ 가 얻어지면 $I_f(x, y)$ 는

$I_b(x, y)$ 를 $h(x, y)$ 와 deconvolution하여 얻고 있다.^[8]

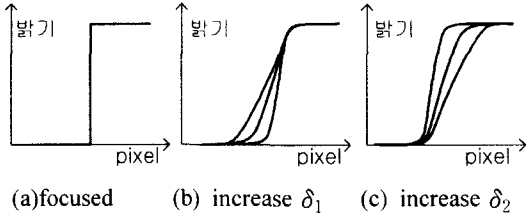


Fig. 4 The variation of the light intensity distribution around the image boundary occurring by moving the object around the focused image position

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_\delta^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_\delta^2}} \quad (3)$$

$$I_b(x, y) = h(x, y) * I_f(x, y) \quad (4)$$

하지만 이러한 방법은 blurring 함수를 명확히 결정하기가 어렵고 계산이 복잡하므로 본 논문에서는 blurring되는 길이 τ 를 측정하여 이로부터 현재의 측정위치가 초점영상의 측정위치에서 얼마나 멀리 있는지를 보여주는 δ 값을 직접 예측하는 방법을 사용한다. 그림 3에서 물체평면 상의 P가 영상평면에서 초점영상을 만드는 점이 Q이다. 따라서 이 카메라의 배율 m 은 $\frac{i}{o}$ 가 된다. 물체평면이 렌즈로부터 δ 만큼 이동하면 그림 3의 카메라구조에서 초점영상의 위치는 Q2가 되며, 이의 좌표값 $(x(Q_2), y(Q_2))$ 는 Q2에 대응하는 blurring 길이 τ_2 를 이용한 닳은 삼각형 관계(식 (5))로부터 다음의 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$\frac{y(Q) + r_2}{i} = \frac{y(Q_2)}{x(Q_2)}$$

$$\frac{y(Q)}{i-f} = \frac{y(Q_2)}{x(Q_2)-f} \quad (5)$$

$$x(Q_2) = \frac{-i \cdot f \cdot y(Q)}{(i-f) \cdot r_2 - f \cdot y(Q)}$$

$$y(Q_2) = \frac{(y(Q) + r_2) \cdot f \cdot y(Q)}{(i-f) \cdot r_2 - f \cdot y(Q)} \quad (6)$$

$x(Q_2)$ 와 δ 를 이용한 렌즈방정식 (식 (7))로부터 δ 를 다음의 식 (8)과 같이 구한다.

$$\frac{1}{o-\delta} + \frac{1}{x(Q_2)} = \frac{1}{f} \quad (7)$$

$$\delta = o - \frac{fx(Q_2)}{x(Q_2) - f} \quad (8)$$

3. 삼각측량법에 기반한 hole 크기 및 변형도 측정

초점영상이 얻어지면 hole의 크기를 측정하기 위해 일반적으로 잘 알려진 삼각측량법을 이용한다. 삼각측량법은 그림 3에서처럼 렌즈를 중심으로 형성되는 영상삼각형과 물체삼각형의 비례관계를 이용하여 영상의 크기로부터 측정대상의 크기를 역으로 계산하는 방법이다. 그림 3에서 영상평면의 Q점과 렌즈축의 원점, 그리고 Q점이 렌즈축에 수직인 점을 포함하는 영상삼각형과 렌즈의 원점, P점, 그리고 P점이 렌즈축에 수직인 세 점이 이루는 물체삼각형의 비례관계로부터 영상평면에서의 Q점 위치를 알면 P점을 알 수 있다.

$$y(P) = \frac{o \cdot y(Q)}{i} = \frac{1}{m} y(Q) \quad (9)$$

위 식에서 $o = x(P)$, $i = x(Q)$ 고 m 은 렌즈의 배율이다. 영상평면에 사용하는 CCD의 화소간 거리가 a (단위: micron)이고 Q점의 y축 화소 수가 k 개라면 영상의 길이는 $a \cdot k$ 가 된다.

3.1 Hole의 크기

Hole의 크기는 hole의 반지름으로 나타낸다. Hole이 완전한 원이 아닌 경우가 대부분이므로 본 논문에서는 hole의 반지름을 중심에서 각 경계선까지의 거리의 평균값으로 정의한다. Hole의 중심으로부터 $1 \sim 360^\circ$ 사이의 각 각도마다 경계선까지의 거리를 측정하는 방법을 사용하였다. 따라서 이를 위해서는 경계선을 정확히 결정해야한다. 그 과정은 다음과 같다.

우선 식(1)에 의해 Hole의 중심 좌표를 구한다. 이 계산된 좌표에서부터 각 각도별로 바깥 방향으

로 나아가며 밝기 정보는 최대 밝기(max_i)를 1, 최소 밝기(min_i)를 0으로 정규화하여 저장한다.

$$R_q(r) = \frac{I_{(x,y)} - \min_i}{\max_i - \min_i}$$

$$q = 1, 2, \dots, 360, \quad r = 1, 2, \dots, r_{\max} \quad (10)$$

$$x = X_o + r \cos(q)$$

$$y = Y_o + r \sin(q) \quad (11)$$

여기서 r_{max}는 최대 거리, I_(x,y)는 (x,y)좌표의 밝기 정보가 된다.

각 각도별 거리를 계산하는 방법은 이상적인 edge와의 상관관계를 통해 얻어진다. 상관관계를 나타내는 cost 함수 C_q(r)중 최소값을 갖게 하는 r이 edge까지의 거리가 된다.

$$C_q(r) = \sum_{i=0}^W |R_q(r+i) - g(i)| \quad (12)$$

$$g(i) = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 < i < \frac{W}{2} \\ 1 & \text{if } \frac{W}{2} < i < W \end{cases} \quad (13)$$

$$r_q = \min_r(C_q(r)) \quad (14)$$

여기서 W는 검색하는 구간 window size이다. 그림 5(a)는 hole의 경계선에서 밝기의 분포를 보여주며 그림 5(b)는 식 (12)를 적용하여 경계점을 찾는 결과를 보여준다.

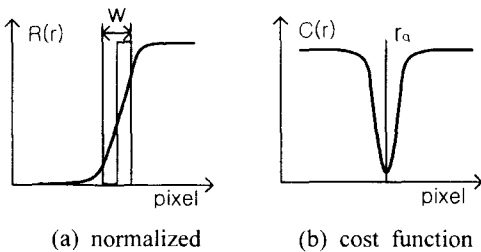


Fig. 5 An example distribution of light intensity and the edge point found by applying the cost function.

Hole 경계선에서의 거칠기를 나타내기 위해 경

계선의 표준편차와 최대, 최소반경을 함께 계산한다.

- 평균반경 : $r = \frac{1}{360} \sum_{q=1}^{360} r_q \quad (15)$
- 최대오차 : $e_{\max} = \max(r - r_q) \quad (16)$
- 표준편차 : $s = \frac{1}{360} \sum_{q=1}^{360} (r - r_q)^2 \quad (17)$

3.2 Hole의 변형도

Hole의 변형도는 hole을 타원으로 고려하여 장축과 단축의 비율로 계산한다. hole을 타원으로 고려하기 위해서 eigen vector 방법을 사용한다.

Hole의 각 각도마다 구한 거리값을 hole의 중심을 원점으로 하는 2차원 좌표로 변환한다.

$$x_q = r_q \cos(q), \quad y_q = r_q \sin(q)$$

$$q = 1, 2, \dots, 360 \quad (18)$$

Hole의 변형도 특성을 eigen vector로 표현하기 위해 (x_q, y_q) 집합에서 normalized scatter matrix A를 구한다.

$$A = \frac{1}{\sum_q (x_q^2 + y_q^2)} \begin{bmatrix} \sum_q x_q^2 & \sum_q x_q * y_q \\ \sum_q x_q * y_q & \sum_q y_q^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

이 matrix A의 eigen vector X1, X2가 장축과 단축을 나타내는 직선이 되고, eigen value λ₁, λ₂가 장축과 단축의 길이를 나타낸다.

$$l_l = \max(\lambda_1, \lambda_2), \quad l_s = \min(\lambda_1, \lambda_2) \quad (20)$$

여기서 l_l는 장축의 길이, l_s는 단축의 길이라 할 때 변형도 ω는 다음과 같다.

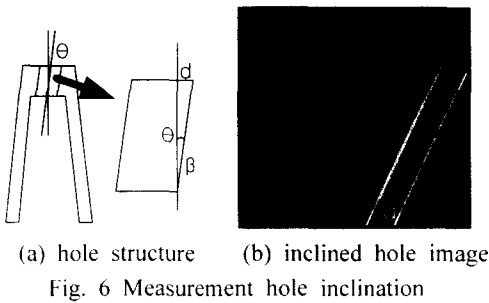
$$\omega = \frac{l_s}{l_l} \quad (21)$$

3.3 Hole의 기울기

Hole의 기울기는 그림 6(a)에서와 보이는 바와 같이 dies 전선유도관과 외형구조물의 두 축 간의 각도를 나타낸다. Dies의 전선유도관이 외형구조물에 삽입될 때, 혹은 사용도중에 변형으로 인해 발

생되는 이러한 현상은 hole의 크기 측정만으로는 검출이 불가능하다. 전선유도관이 기울어진 경우, 측정되는 hole의 영상에는 그림 6(b)와 같이 그림자가 발생하게 되며 그림자의 크기에 의해 hole의 기울어짐을 추정할 수 있다. 전선유도관의 길이를 β 라하고 그림자의 길이가 d 이면 기울기 θ 는 다음의 식 (22)에 의해 결정된다.

$$\theta = \sin^{-1} \frac{d}{\beta} \quad (22)$$



3.4 Hole의 정상/불량 판정

위에서 hole의 형태 정보를 위해 측정 반지름, 변형도, 기울기 등을 구했다. 이 정보들은 모두 hole의 정상/불량을 판정하는 기준이 된다. Dies가 정상 판정을 받기 위해서는 측정 반경, 변형도, 기울기 등이 모두 정상형태에서 일정범위 안에 들어와야 한다. 일반적으로 반경오차는 2micron 미만, 변형도 0.99이상, 기울기는 1° 미만이어야 정상 판정을 받는다.

4. 시스템의 구현 및 실험 결과

본 연구에서는 제안한 hole의 크기 및 형태 측정을 위한 자동초점 비전검사기를 시중에서 쉽게 저가로 구입 가능한 카메라와 영상보드를 이용하여 구현하였다. 본 논문에서 측정하려는 dies hole의 크기, 즉 직경은 1mm이하의 크기로 0.1mm까지를 포함한다. 제어기는 Pentium II 200 Mhz processor를 이용하였으며 구현한 시스템의 외관은 그림 7과 같다.

시스템은 다음과 같이 구성된다. 영상을 입력받는 CCD부분과 XYZ stage를 제어하는 motor control



Fig. 7 The picture of the implemented vision inspection system.

부분, 그리고 영상처리 및 stage의 위치를 계산하는 main 부분으로 나뉘어 진다. main 부분에서는 CCD에서 얻은 영상을 처리하여 stage가 어느 위치로 이동해야 하는지를 결정한다. 이 결정된 위치를 motor control부에 전달하게 된다. data 전송은 serial을 사용한다. motor control부는 main부에서 받은 위치 정보를 이용해 XYZ stage를 정확한 위치로 이동한다. stage에 사용한 motor는 stepping motor를 사용하였고 원점 보정을 위해 limit switch를 이용하였다. 측정하려는 dies를 카메라의 시계 내에 이동하는 XY 서보제어기는 pitch 간격이 3mm인 슬라이더를 step 모터를 이용하여 400등분하여 펄스당 7.5micron 이동하도록 설계하였다. Z축 서보제어기는 pitch 간격이 1mm인 슬라이더를 이용하였다.

본 논문에서 측정하려는 dies hole의 크기, 즉 직경은 1mm이내이다. 1mm이내의 길이를 1micron 이하의 오차 범위에서 측정하려면 CCD의 한 화소에 물체평면상의 최대 1micron 길이가 투영되어야 한다. CCD의 크기가 8mm×6mm 이고, 640×480 의 해상도를 가질 때 한 cell의 크기는 12.5micron이 된다. 이때 물체평면상의 1micron 크기가 한 cell에 맺히게 하기 위해서는 렌즈의 배율이 12.5배 이상이 되어야 한다. 따라서 구현한 시스템은 초점거리 3mm, 배율이 12.5인 렌즈를 사용하였다.

구현한 시스템을 이용하여 0.1mm에서 1mm사이의 dies를 대상으로 측정한 결과 검사기는 평균 3회의 측정을 통해 초점 영상을 얻을 수 있었고, 10회 반복 측정한 결과의 평균측정오차는 0.8micron으로 1micron 미만의 정확도를 보였다. 그림 8은 9

개의 dies를 측정하는 시스템의 사용자 화면을 보여주며 표 1은 검사결과 얻어진 정상과 비정상인 dies의 유형을 보여준다. 9개의 dies를 검사하는 경우 검사시간이 90초로 한 개당 10초 정도의 검사시간이 소요되며 수동으로 초점을 맞추는 검사기에 비해 속도 면에서도 빠른 것을 보였고, 속도는 빠른 프로세서의 사용과 응답속도가 빠른 모터를 사용하여 2배 이상 개선 할수 있다.

그림 8은 검사의 진행상황을 보여주는 사용자 화면을 보여주고 표 1에는 정상과 비정상의 판정을 구분해 주는 몇 개의 특징적인 예를 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 자동으로 초점영상을 획득하는 비전시스템을 이용하여 1mm 미만의 소형 coating dies를 1micron 이내의 정밀도로 크기나 형태를 검사방법을 구현했다. Hole의 초점영상을 신속하게 획득하기 위해 영상의 경계선에서의 밝기분포 특성을 이용하여 2회의 보조측정으로 측정위치를 정확히 예측하는 방법을 제안하였고 이의 구현을 위해 비전서보제어기를 사용하였다. 검사기는 hole의 크기, 변형도, 불순물의 존재여부, 삽입시의 기울기 등을 정확하게 판정함을 보였으며 시중에서 저가로 손쉽게 구입 가능한 비전시스템을 이용하여 구현할 수 있음을 보였다. 제안한 검사방법은 coating dies 뿐 아니라 PCB의 hole등 점차 소형화되는 조립관련 부품을 검사하는데 응용될 수 있다.

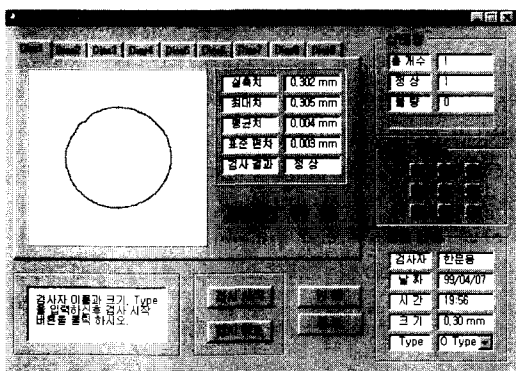


Fig. 8 The user screen of the vision inspection system.

Table 1 Various shapes of holes measured by the vision inspection system.

입력영상				
	정상	막힘	찌그러짐	기울어짐
측정크기	0.302mm	0.289mm	0.304mm	0.298mm
표준편차	0.003	0.012	0.005	0.009
변형도	0.993	0.785	0.877	0.964
기울기	0.15°	0.47°	0.23°	1.14°
판정결과	정상	불량	불량	불량

참고 문헌

1. R. Jain, R. Kasturi, B. G. Schunck, "Machine Vision," McGraw-Hill, 1995.
2. Juds, Scott M, "Photoelectric sensors and controls," Dekker, 1990.
3. J.T. Feddema and R.W. Simon, "CAD-Driven Microassembly and Visual Servoing," Proc. of ICRA 1998, pp. 1212-1219, 1998.
4. H. Yoda, Y. Ohuchi, Y. Taniguchi, and M. Ejiri, "An automatic wafer inspection system using pipeline image processing technique," IEEE Trans. on PAMI, vol. no. 1, pp. 4-15, 1988.
5. K.Koyano, T.Sato, "Micor Obejcth andling System with Concentrated Visual Fields and New Handling Skills," Proc. of ICRA 1996, pp. 2541-2548, 1996.
6. W. Zesch, M. Brunner, A. Weber, "Vaccum Tool for Handling Microobjects with a Narorobot," Proc. of ICRA 1997, pp. 1761-1766, 1997.
7. J.T. Feddema and R.W. Simon, "Visual Servoing and CAD-Driven Microassembly," Magazine of IEEE Robotics and Automation, vol. 5, no. 4, pp. 18-24, Dec. 1998.
8. S.K. Nayar and Y. Nakagawa, "Shape from Focus," IEEE Trans. on PAMI, vol. 16, no. 8, pp. 524-831, August 1994.