

본연구는 LG전자 생산기술연구센터에 의해 지원되었으며, 연구에 도움을 주신 이동철선임연구원께 감사드립니다.

비전프로브를 이용한 CRT 전자총의 자동치수 검사

박현구*, 박민철*, 김승우*

Automatic Inspection of Assembly Tolerances of Cathod Ray Electron Guns by Vision Probe

Hyun-Goo Park*, Min-Cheol Park*, Seung-Woo Kim*

ABSTRACT

This paper describes an automatic measurement method for the in-line inspection of assembly tolerances of cathod ray electron guns. The method uses an optical microscope with a CCD camera as a probe. An automatic gap recognition algorithm with digital image processing and a new software autofocus algorithm based on using an optimal edge detector have been developed to improve the measuring accuracy. An inspection system has been proposed and practically implemented for in-line inspection to a real factory automation line. The inspection system consists of a gap inspection part and an eyelet. Total time consumed for inspecting all measuring items is about 10 seconds and the repeatability is below $\pm 5\mu\text{m}$

Key Words : Edge Detection(에지검출), Autofocusing(자동초점), Vision Probe(광학현미경), Cathod Ray Electron Gun (전자총)

1. 서 론

전자총은 일정 밝기와 방향을 갖는 전자빔을 발생시켜 CRT의 형광화소에 주사하여 발광시킴으로써 최종적으로 영상을 나타내는 역할을 한다. 전자총에서는 전자빔의 발생, 가속, 집속의 3단계 작업이 이루어지고 생성된 빔은 R, G, B 3개의 전자총을 통해 브라운관의 3개의 형광화소에 각각 입사된다. Fig.1은 전자총의 개략적인 모습이다. 전자총에서 전자빔의 발생, 가속, 집속은 전자총을 이루는 각 전극에 의해 결정되고, 생성된 전자빔들의 방향과 밝기는 전극 사이의 간격과 평행도에 영향을 받는다.

아이렛(eyelet)은 전자총과 캐소드(cathod)의 연결 부분으로 아이렛의 규격은 캐소드와의 연결정도를 결정한다. 따라서, 수작업에 의해 조립되는 전자총의 전극 사이의 간격과 아이렛치수관리는 전자총의 성능을 결정하는 요소가 되고 이는 CRT의 전체 성능을 결정짓는 중요한 변수가 된다.

현재까지 이들 치수들은 검사용 표준시편(Go/No gauge)을 측정부분에 삽입하거나 투영기(projector), 3차원 측정기등을 이용하여 측정하였다. 측정용 게이지와 3차원측정기는 접촉방식으로 측정을 하기 때문에 전자총에 변형을 줄 수 있으며, 두 가지 측정방법은 모두 사람의

* 한국과학기술원 기계공학과

손을 통한 수동식으로 이루어져 측정 반복능이 낮고 검사 속도가 떨어진다. 따라서, 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 측정 시스템의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 측정시 전자총에 변형을 주지 않기 위해 비접촉식 비전프로브를 제작하였고, 이를 장착시킨 자동 측정시스템을 간격측정용 및 아이렛측정용에 대하여 각각 개발하였다. 그리고, 측정의 반복능과 정확도를 향상시키기 위해 현미경 프로브의 CCD카메라에 맺힌 영상의 처리에서 최적 에지 검출 연산자를 사용하였고, 이를 이용한 자동 초점 알고리즘을 개발하였다.

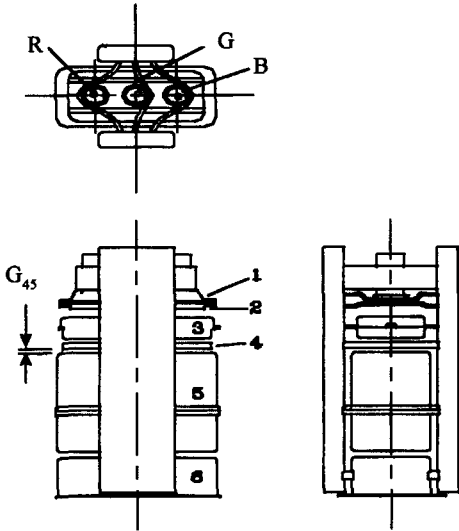


Fig.1 Cathod ray electron gun

2. 측정원리

전자총의 검사항목은 Fig.1에서와 같이 크게 아이렛부분과 전극사이의 간격부분으로 나누어진다. 이들 두 부분은 세부적으로 다음과 같은 측정 항목들을 갖는다. 첫째, 아이렛부분에서는 아이렛의 크기와 아이렛과 전극 1에 존재하는 홀사이의 동심도를 검사하여야 한다. 둘째, 전극의 간격부분에서는 모든 전극사이의 간격 $C_{i,i+1}$ ($i=1 \sim 5$)의 크기와 평행도를 측정하여야 하고 평행도는 다시 한 면에서의 간격평행도와 R면과 B면사이의 간격평행도로 나뉜다. 이들 항목들의 검사정도는 $\pm 5\mu m$ 의 반복능을 가져야 한다. 기존의 방법들은 측정과정에서 시편에 변형을 주고 일부 항목에 대해서는 측정 자체가 불가능하다. 따라서, 이러한 문제점들을 해결하고 측정정

도를 높이고 자동생산라인에 응용하기 위하여 Fig.2와 같은 광학현미경을 프로브로 사용하였다.

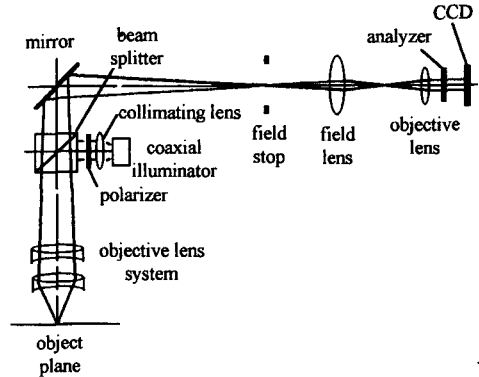


Fig.2 Optical configuration of vision probe

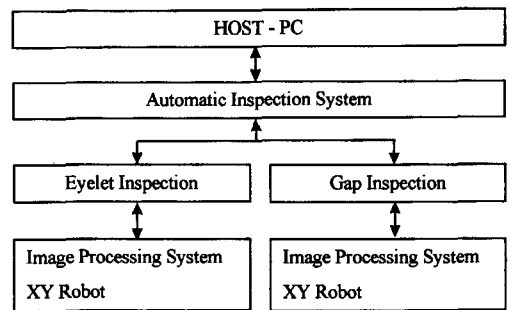


Fig.3 Schematic diagram of cathod ray electron gun

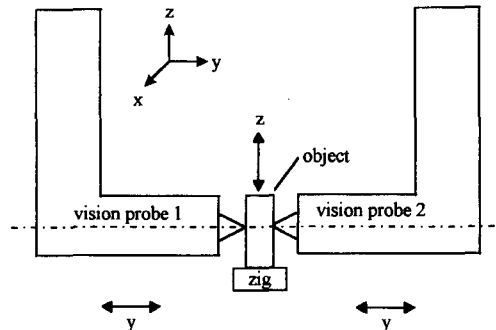


Fig.4 System for gap inspection

전체검사시스템은 Fig.3에서와 같이 간격과 아이렛검사부로 구성된다. 이들 검사부의 광학계는 각각 Fig.4와 Fig.5에서 보여주고 있다. 간격검사부는 지그에 고정된 전자총의 R면과 G면의 간격을 측정하기 위해 2대의 비

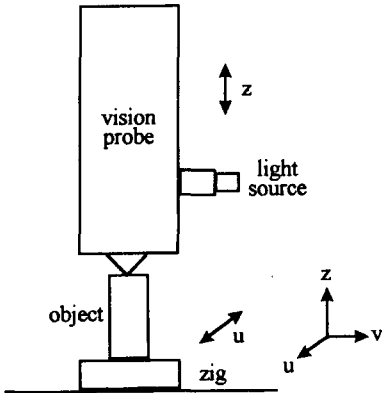


Fig. 5 Optical system for eyelet inspection

전프로브를 y축으로 구동시켜 측정한다. 측정면에 대한 조명으로 선명한 영상을 얻기 위하여 동축조명과 배사조명을 동시에 사용하였다. 아이렛검사부에서는 지그에 의해 고정된 전자총의 z축 방향으로 비전프로브를 이동하여 아이렛과 전극홀사이의 동심도를 측정한다.

비전프로브를 이용한 측정은 CCD카메라에 맺힌 상의 영상처리로 수행되므로 맺힌 영상의 선명한 정도는 측정에 매우 큰 영향을 주게 된다. 따라서, 영상의 선명함을 유지하기 위해서는 영상이 가장 선명히 맺힌 위치를 찾아주는 자동초점이 측정 이전에 반드시 수행되어야 한다. 비접촉식 프로브에서의 자동초점은 CCD카메라에 맺힌 영상의 정보를 이용하여 이루어진다. 초점위치는 영상에 존재하는 공간고주파수(high spatial frequency)성분의 크기를 얻어 그 값이 최대가 되는 값으로 계산된다. 이때, 공간 고주파수 성분의 값을 에너지(energy)로 정의하고, 일반적으로 프로브의 위치의 이동에 따른 에너지 값의 변화는 가우시안 분포를 갖는다. 초점에 맺힌 점은 에너지 값이 최대인 점 즉 가우시안 분포값의 최대인 점이다. 영상처리를 이용한 자동 초점 방법에는 SMD(sum modules difference), GMM(gradient magnitude maximization), 푸리에변환법등 여러가지가 있다³⁾. 하지만 전자총의 아이렛이나 간격의 측정에서는 초점의 위치가 측정대상인 아이렛의 에지나 간격의 에지에 맞춰져야 한다. 따라서, 기존의 방법을 적용하기 위해서는 아이렛과 틈새의 에지를 영상에서 구분하는 작업이 선행되어야 하므로 기존의 방법들의 적용에는 많은 문제점이 따른다.

에지검출은 3절에서 기술한 바와 같이 가우시안 미분연산자를 에지검출을 위해 영상에 적용하고 적용후의 결과

값 $H(x)$ 를 이용하여 이루어진다. 이때, $H(x)$ 의 크기는 에지의 선명도(contrast)를 나타내는 것으로 그 값이 클수록 에지가 명확히 나타난다. 따라서, 에지점에서의 $H(x)$ 를 에너지로 정의하면 에너지의 최대값은 에지가 가장 선명한 점에서 얻어지고 결국 이점이 초점이 맺힌 점이 된다. 이러한 방법으로 초점위치를 찾게 되면 에지 검출과 동시에 자동초점이 이루어져 기존의 자동 초점방법에서의 문제점을 해결할 수 있다. 위에 기술한 방법에 의해 자동적으로 초점이 맞추어지면 영상처리 알고리즘에 의해 자동적으로 에지를 인식하여 측정값을 산출하게 된다.

3. 영상처리

아이렛부분과 간격부분의 측정은 모두 현미경 프로브의 CCD 카메라에 맺힌 영상을 통해 이루어지므로 높은 측정 정도를 유지하기 위해서는 영상 처리를 수행하는데 있어서 측정 항목의 에지 검출 오차(edge detection error)가 아주 적어야 한다. 따라서 검출된 에지점의 정확도가 보장되고 외란의 영향을 적게 받는 새로운 에지 검출 연산자의 적용이 필요하게 된다. 에지(edge)는 영상에서 색이나 빛의 밝기에 따른 급작스러운 변화에 의해 생기는 정보로서 물체의 테두리나 물체간의 경계에 해당한다. 따라서, 에지 검출이란 영상에서 빛의 밝기 차이가 나타나는 곳의 경계를 선으로 나타내 주는 것이다. 따라서, 영상에서 에지는 영상밝기의 급격한 변화로 볼 수 있고, 이러한 밝기변화는 영상의 미분 값들로 잘 표현된다. 에지는 영상에 대한 일차 미분의 최대 값들이나 이차 미분의 해가 되는 점들로 검출된다. 이상과 같은 원리를 응용하여 소벨(Sobel) 연산자, 프레윗(Prewitt)연산자, 그리고 라플라시안(Laplacian) 연산자등 많은 연산자들이 에지 검출을 위해 적용되었다¹¹⁾. 그러나, 이러한 미분 연산자들은 일반적으로 외란에 민감하게 반응하는 특성이 있고, 특히 그들의 작은 창크기(window size)로 인하여 외란의 효과를 제거하기가 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 창의 크기를 크게 하므로서 많은 수의 강도 점들과의 연산으로 해결 될 수 있다. 하지만 창의 크기가 커지게 되면 연산자에 응용되는 함수 값들의 분포가 넓게 퍼져 영상에서의 정에지점(true edge)에서 벗어난 점들 에지로 검출하는 단점이 있다.

에지 검출 연산자는 에지 검출에서 요구되는 외란 효과의 약화와 정확한 에지점의 검출이라는 두 가지 조건을 만족하여야 한다. 그러나 이 두 가지의 조건은 서로 동시

에 만족될 수 없으므로 두 조건을 최적으로 만족시키는 에지 검출 연산자를 찾아야 한다. Canny⁽²⁾는 에지 검출 연산자의 조건을 첫째, 외란을 에지로 검출하지 않으며 둘째, 검출된 에지가 정에지점이어야 하고 셋째, 하나의 에지점에 대해 대응되는 에지 검출점은 단 하나여야 한다고 가정하여 이들을 모두 수식화 하고 세 가지 조건을 만족하는 식(1)과 같은 최적의 에지 검출 연산자 $f(x)$ 를 구하였다.

$$f(x) = a_1 e^{\alpha} \sin \omega x + a_2 e^{\alpha} \cos \omega x + a_3 e^{-\alpha} \sin \omega x + a_4 e^{-\alpha} \cos \omega x + c \quad (1)$$

여기서, $a_1, a_2, a_3, a_4, c, \alpha,$ 그리고 ω 는 에지 연산자 함수를 결정하는 상수이다⁽²⁾. 식(1)의 $f(x)$ 는 다음식과 같이 가우시안 함수의 1차 미분형태로 근사화할 수 있다.

$$f(x) = \frac{\mu - x}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

에지검출은 μ 와 σ 는 각각 가우시안 함수의 평균과 표준편차이다. 에지검출연산자 $f(x)$ 와 영상의 강도분포 함수 $G(x)$ 와의 콘볼루션(convolution)으로 이루어진다. 결과식 $H(x)$ 는 다음과 같다.

$$H(x) = \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} G(x-u)f(u) du \quad (3)$$

여기서 W 는 Fig.6에서 도시된 바와 같이 에지연산자 함수의 폭을 의미한다. 실제 적용에서는 $f(x)$ 와 $G(x)$ 가

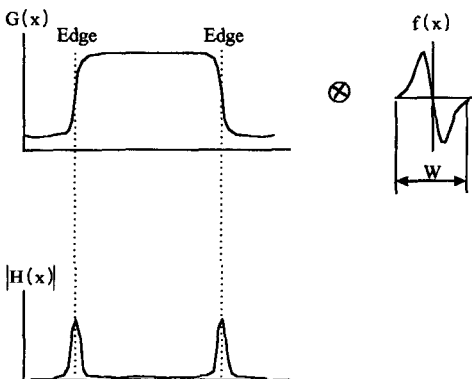


Fig. 6 Edge detection method using convolution with the first-order derivative gaussian function

연속함수가 아니고 이산화된 값을 가지므로 $f(x)$ 의 변수들의 값을 결정해야 한다. 가우시안 함수에서는 μ 는 평균값을, 그리고 σ 는 표준편차를 의미하지만, 가우시안 미분 연산자에서는 μ 는 창의 크기를 결정하고 σ 는 영상의 강도 분포 함수 $G(x)$ 에 대한 민감도(sensitivity)를 결정하는 변수가 된다. Fig.6은 에지검출의 적용과정이다.

4. 아이렛의 지름 및 편심량 측정

Fig.7은 아이렛에서 측정되어야 할 항목들을 도식적으로 나타낸다. R, G, B 각 전자총의 아이렛에 대하여 지름과 편심량이 측정항목이 되고, 아이렛의 지름은 내부원의 지름 D_i ($i = R, G, B$)로 정의한다. 편심량은 아이렛의 내부원과 전극홀의 벗어난 정도를 나타내고 내부원의 중심 C_E 와 홀의 중심 C_H 와의 차이값 e_i 로 정의되며 다음과 같다.

$$e_i = |\vec{C}_{Ei} - \vec{C}_{Hi}|, \quad (i = R, G, B) \quad (4)$$

측정은 현미경 프로브를 측정하고자 하는 아이렛으로 이동하여 아이렛의 지름과 중심을 찾고 다시 현미경 프로브를 전극홀면으로 이동시켜 홀의 중심을 찾아 편심량을 계산하는 과정으로 이루어진다. 아이렛과 홀은 중심에서 $n\Delta\theta$ 방향으로 취득된 에지점들을 원맞춤하여 산출한다. 원의 일반식은 식(5)와 같이 정의하고 원의 중심을 최소사승법으로 적용하여 산출하기 위해 식(6)의 선 형식의

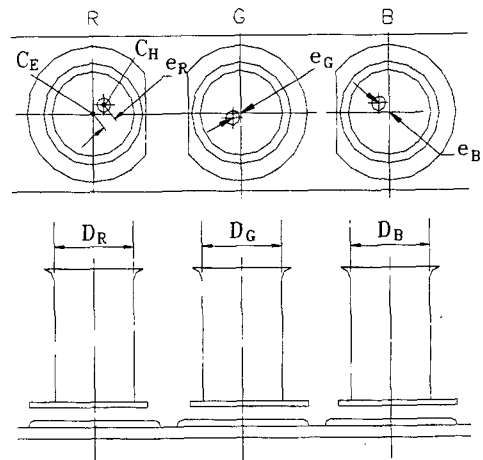


Fig. 7 Measuring items for eyelet inspection

로 변형한다⁽⁴⁾.

$$(u-a)^2 + (v-b)^2 = r^2 \quad (5)$$

$$E_k = 2ar_k + 2bs_k + u_i^2 - u_j^2 + v_i^2 - v_j^2 \quad (i, j < N) \quad (6)$$

여기서, $r_k = (u_j - u_i)$, $s_k = (v_j - v_i)$, ($k = 1, \dots, n(n-1)/2$)이고, u, v 는 아이렛측정을 위한 좌표계이고, 식(6)의 오차제곱합을 매개변수 a, b 에 대해 편미분하여 최소자승해를 구한다. 반지름 r 은 매개변수 a, b 를 원의 일반식에 대입하여 각 에지점들의 좌표값을 대입하여 얻은 반지름 값들의 평균값들로 취하며 다음과 같이 표시된다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(u_i - a)^2 + (v_i - b)^2}}{N} \quad (7)$$

그러나, 프로브 축에 대해 아이렛의 기울어짐으로 인한 그림자와 원 외부의 표면의 거칠기로 인한 수많은 외란으로 인해 에지검출에 큰 어려움이 있다. 따라서, 취득된 에지점들중 외란의 에지점임을 판정하고 제거하는 외란 검출 알고리즘이 필요하게 되었고, 다음과 같이 2단계로 수행된다. 1차 외란 검출은 검출된 그림자 에지점의 에너지가 원에지점들의 에너지보다 상대적으로 떨어지게 되는 성질을 이용하여 식(8)과 같은 비교로 검출하였다.

$$E_{edge}(n) \geq \mu_{edge} - C \sigma_{edge}, \quad (n = 1, \dots, N) \quad (8)$$

여기서, μ_{edge} 와 σ_{edge} 는 각각 에너지 값들의 평균과 표준 편차이다. 상수 C 는 σ_{edge} 에 의해 결정되는 값으로 Table. 1에 주어진다. 식(8)을 만족하는 에지점들만이 원의 에지로 간주된다.

2차 외란검출은 제거된 그림자 에지점 외에 표면에 존재하는 아주 밝은 외란이 에지로 검출된 경우의 검출방법이다. 표면 외란 에지점들은 그 수가 매우 적고 아이렛에서 떨어져 있으므로 맞춤된 원에서 다른 점들보다 크게 벗어나게 된다. 따라서 1차 외란 검출 적용 후 원맞춤된 원의 중심 C_N 과 각 점들의 좌표 $P_i(x, y)$ 와의 거리 D_i 를 이용하여 2차 외란을 검출할 수 있다.

$$D_i = |\bar{P}_i - \bar{C}_N| \quad (9)$$

$$\mu_D - 1.5\sigma_D < D_i < \mu_D + 1.5\sigma_D \quad (10)$$

여기서 μ_D, σ_D 는 각각 D_i 의 평균과 표준편차이다. 식

(10)을 만족하는 에지점들이 최종적으로 결정된 아이렛의 내부 원의 에지가 된다.

아이렛측정을 위해 사용된 비전프로브의 분해능은 ($9.8 \mu m, 7.9 \mu m$)이다. Fig.8은 현미경 프로브의 CCD카메라에 맺힌 아이렛과 전극홀의 영상이다. 영상에서 에지 검출을 통한 측정이 수행된다. 이상에서 기술한 측정 알고리즘을 적용하여 측정하면 아이렛의 지름과 편심량 모두 측정 반복능 $\pm 4 \mu m$ 를 가지고 측정할 수 있다.

5. 간격 및 평행도 측정

Fig.1에서와 같이 전극 i 와 $i+1$, ($i = 1, \dots, 5$)사이의 간격 $G_{i,i+1}$ 은 R면과 G면에 모두 10개가 존재한다. 이것들 중에서 한 면에서의 간격 $G_{i,i+1}$ 의 평행도를 단축

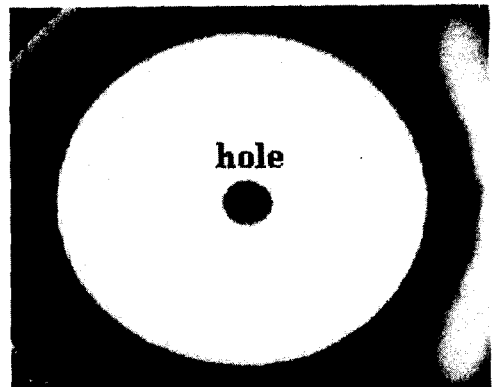
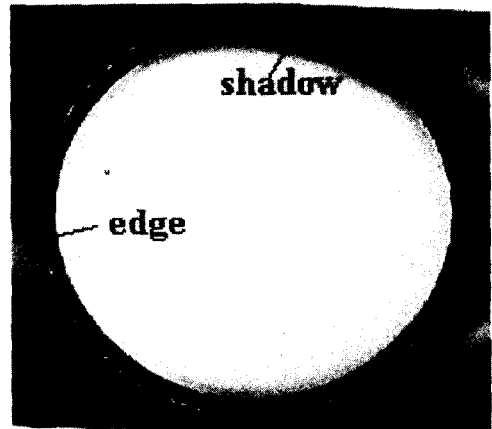


Fig. 8 Images captured by eyelet inspection system

평행도라 하고 R면과 G면에서 서로 마주보는 관계를 가진 간격의 평행도를 장축 평행도라 한다. 한 면에서의 간격은 Fig.9에서와 같이 1차직선 L1과 L2로 표현된다. 직선 L2의 중심 C에서 양쪽으로 0.7mm 떨어진 점 P_{1R} , P_{2R} 의 좌표 (u'_1, v'_1) , (u'_2, v'_2) 를 구한다. 이들 두 점으로부터 직선 L1과의 간격 d_{1R} , d_{2R} 를 식 (11)과 같이 구하고, R면에서의 단축 평행도 Δp_R 를 d_{1R} , d_{2R} 의 차이로 정의한다.

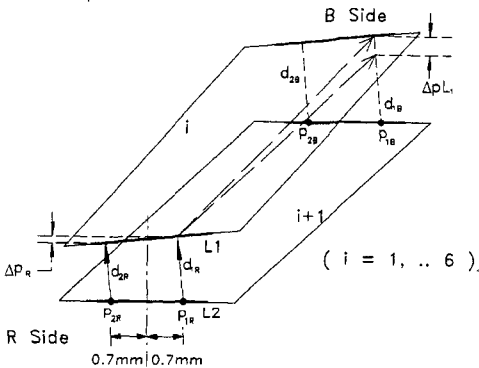


Fig. 9 Measuring items for gap inspection

$$d_{iR} = \frac{|au'_i + b - v'_i|}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (i = 1, 2) \quad (11)$$

$$\Delta p_R = |d_{1R} - d_{2R}| \quad (12)$$

G면에 대해서도 같은 방식으로 간격 d_{1B} , d_{2B} 와 간격 평행도 Δp_B 를 구할 수 있다. 그리고, 이들 간격중에서 양방향으로 서로 대응되는 간격, 즉, d_{1R} , d_{1B} 와 d_{2R} , d_{2B} 사이의 평행도 ΔpL_1 , ΔpL_2 를 식 (13)으로 정의하면 두 평행도중의 최대값을 장축 평행도 ΔpL 로 정의되고 다음과 같다.

$$\Delta pL_i = |d_{iR} - d_{iG}| \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

$$\Delta pL = \max(\Delta pL_1, \Delta pL_2) \quad (14)$$

측정과정은 R면의 현미경 프로브를 측정 간격으로 이동하여 간격 및 단축평행도를 계산하고 G면에서의 간격을 R면과 같은 방식으로 측정한 뒤, G면과 R면의 간격에서 장축 평행도를 계산하는 순서로 이루어진다. 이때 측정된 간격의 직선 L1과 L2는 취득된 N개의 에지점들의

좌표값으로 $y = ax + b$ 의 일반 선맞춤을 하여 얻어진다 (4). 선 맞춘 직선의 변수 a, b는 다음과 같다.

$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N u_i v_i - \sum_{i=1}^N u_i \sum_{i=1}^N v_i}{N \sum_{i=1}^N u_i^2 - (\sum_{i=1}^N u_i)^2} \quad (15)$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^N v_i - a \sum_{i=1}^N u_i)}{N} \quad (16)$$

아이렛측정을 위해 사용된 비전프로브의 분해능은 (3.9 μ m, 3.1 μ m)이다. Fig.10은 현미경 프로브의 CCD 카메라에 맺힌 간격의 영상이다. 간격 측정 알고리즘을 적용하여 측정하면 간격, 단축평행도, 장축평행도 모든 항목에 대해 측정반복능 $\pm 4\mu$ m를 가지고 측정할 수 있다.

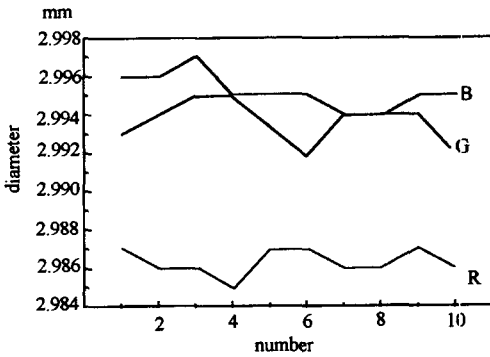


Fig. 10 Image captured by gap inspection system

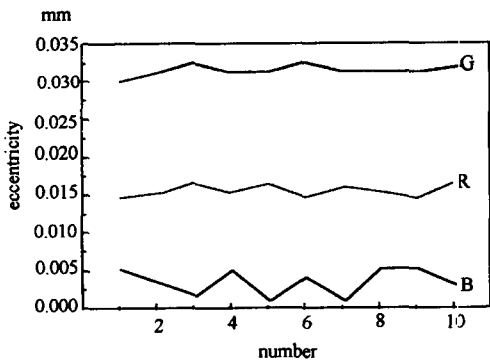
6. 결 론

본 연구에서는 비접촉식 비전프로브를 이용한 전자총 자동측정 시스템을 개발하였다. 자동측정은 에지검출을 통한 영상처리에 의해 수행되었고 새로운 자동초점 알고리즘을 제시하여 개발하였다. Fig.11과 Fig.12는 실제로 전자총의 자동검사공정에 설치된 검사시스템을 이용하여 반복측정한 결과를 보여준다. Fig.11은 아이렛의 지름과 아이렛과 전극홀사이의 편심량을 측정한 결과이며 Fig.12는 여러개의 전극중에서 다섯 번째 전극과 여섯 번째 전극사이의 간격 및 평행도를 측정한 결과를 보여준다. 전자총에는 세 개의 전극이 있으며 이들 전극은 R(Red), G(Green), B(Blue)로서 구분된다. 이 결과에서 그림자등의 영향을 외란 검출 알고리즘을 이용하여 제

거하므로서 측정 반복능이 향상되었음을 알 수 있었고 모든 측정 항목에 대하여 $\pm 4\mu\text{m}$ 의 반복능을 갖는다. 측정 반복능에 영향을 미치는 요소는 구동축의 기울어짐, 낮은 구동분해능으로 인한 자동초점에서의 오차, 그리고, 카메라 보정(calibration)의 오차로 구분할 수 있다. 본 연구에서 개발한 시스템은 전자총뿐만 아니라 선이나 원의 기하학적 형상을 갖는 물체의 측정에 응용될 수 있다.



(a) diameters of eyelet

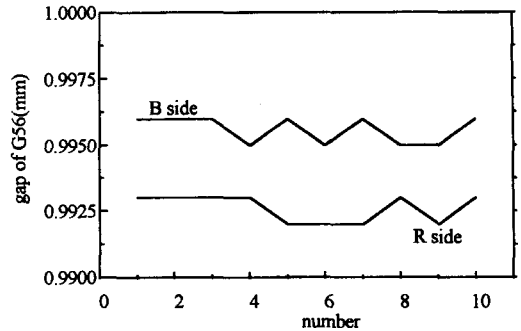


(b) eccentricities between holes and eyelets

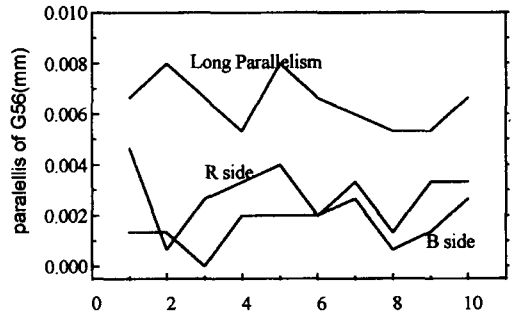
Fig.11 Measured results for eyelet inspection

참 고 문 헌

1. Gonzalez, Rafael C., "Digital Image Processing", Addison-Wesley, pp.416-429, 1992.
2. Canny, J., "A Computational Approach to Edge Detection", IEEE Transactions of Pat-



(a) gap



(b) parallelism

Fig.12 Measured results for gap inspection

- tern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 6, pp.679-698, 1986.
3. Krotkov, E., "Focusing", Int. J. Computer Vision, 1, pp.223-237, 1987.
4. 김승우, "기하공차의 평가를 위한 형상추출 알고리즘", 대한기계학회지, 제 34권, 제 3호, pp.177-184, 1994.
5. Shen, J., "An Optimal Linear Operator for Step Edge Detection", CVGIP: Graphical Models And Image Processing, Vol. 54, No. 2, pp. 112-133, 1992.
6. Bergholm, F., "Edge Focusing", IEEE Transactions of Patern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, NO. 6, pp. 726-741, 1987.