

## 디지털 이미지 프로세싱을 이용한 자동 두께 측정장치 개발

김 영 일\*

이 상 길\*\*

\* 두원공업전문대학 기계과 \*\* 마이크로비전 연구실

### (Development for Automatic Thickness Measurement System by Digital Image Processing)

YOUNG-IL KIM\*

SANG-GILL LEE\*\*

#### ABSTRACT

The purpose of this paper is to develop an automatic measuring system based on the digital image processing which can be applied to the in-process measurement of the characteristics of the thin thickness. The derivative operators is used for edge detection in gray level image. This concept can be easily illustrated with the aid of object shows an image of a simple light object on a dark background, the gray level profile along a horizontal scan line of the image, and the first and second derivatives of the profile. The first derivative of an edge modeled in this manner is 0 in all regions of constant gray level, and assumes a constant value during a gray level transition. The experimental results indicate that the developed automatic inspection system can be applied in real situation.

Key Words : Digital Image Processing, Optical Set-Up, In-Process, Automatic, Thickness Measurement, Measuring Design and Manufacture

#### I. 서 론

기계의 자동화에 대한 요구가 마이크로일렉트로닉스 기술의 급속한 발전에 의해 충족되면서 기계와 전기를 접목시킨 자동화가 비약적으로 발전하고 있으며 최근에는 비접촉 측정에 대한 관심이 고조되면서 광학기술 응용을 병합한 새로운 산업용용 분야를 요구함에 따라 종래의 기술로는 실현 불가능한 것이 복합기술의 발전에 힘입어 가속화되고 있다.[1][2]

자동화기술은 여러 분야에 적용되고 있으나 생산공장에서의 적용이 대표적이며, 이 영역에서 무인화 공장을 지향하는 FA(Factory Automation)용 센서, 관련부품의 발전이 급속히 전개되고 있다. 이러한 자동화는 단계적으로 발전해 가는데, 즉 수작업 단계, 기계화 단계, 단위기계의 일부 자동화, 단위기계의 완전 자동화, 생산라인의 자동화, 공장 전체의 자동화로 분류되는데[3] 본 연구는 단위 기계의 완전 자동화에 속한다.

우리나라 자동화 사업의 역사는 1970년초에 효성정밀(주)에서 플레이백로봇관공 개발하여 압실에서 용화필름용 현상, 처리할 수 있도록 실용화한데시 시작되어 1980년대에 들어서면서 공장 자동화에 대한 기업들의 인식이 제고되면서 무인반송차, PLC, 센서등 소프트웨어기 위주로 기타 자동화기기의 사용에 대한 관심

도 고조되고 있다. 그러나 NC콘트롤러, Servo Motor 등 핵심부품은 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이나 각종 Parts Feeder에 의한 자동 부품 공급장치 개발 업체는 서울 근교만하더라도 30여군데 업체가 종사하고 있는 실정이다. 그런데 단위기계를 자동화하는 경우에는 시스템의 복잡성 및 다양성이 현저하고, 그 질적 향상이 더욱 요구됨에 따라 본 연구에서는 이송라인, 분류작업 및 측정의 신속성을 조합한 자동화기계를 개발하고자 한다. 본 연구에서 자동계측 대상물은 반도체 부품으로 사용되는 0.1mm 박판의 두께를 가지고, 허용 공차도  $\pm 1 \mu\text{m}$  으로 초정밀한 선별능력을 가지고 있어야 하며, 취성이 강한 특징을 지니고 있다.

각종 부품의 자동검사 기능은 공장자동화 공정에 있어서 가장 중요한 공정 중의 하나로 생산된 제품의 신속한 양, 불량의 판별과정이 필수적인 요소로 실시간 부품 규격의 치수공차 범위내에 있는지 여부를 판정할 수 있는 시스템을 개발함으로써 품질향상은 물론 생산성 및 가동율을 향상시키기 위한 목적으로 짧은 시간 내에 부품검사가 가능하도록 비접촉 광학적기법을 동원하여 설계 및 제작하였으며 데이터 처리속도는 부품 검사 능력과 밀접한 관계를 가지므로 실시간 처리가 가능하도록 최근 전자공학에서 각광을 받고있는 디지털 이미지 프로세싱 기법을 응용한 온 라인 처리를 행할 수 있도록 연구, 개발하였다.

## II. 관련이론

### 2.1 이미지형성 원리

비접촉 광학측정기법을 이용하여 정렬된 부품에 대한 이미지를 형성시켜 두께를 직접측정할 수 있도록 구성하여 양·불량의 판정을 실시간처리할 수 있는 알고리즘을 개발하기 위해 다음과 같은 방법을 연구,검토하였다. 제품의 손상을 줄이거나 없애기 위해 일반적으로 비접촉,광학적방법을 많이 사용하는데 특히 미소 두께 측정의 광학적 측정방법으로는 그 요구되는 정밀도 및 대상에 따라 간섭칼라(Interference Color)를 이용하는 방법[4], Tolansky's Interferogram을 이용하는 방법[5], Interference Microscope를 이용하는 방법[6]등이 있다. Interference Color 측정방식은 수  $\mu\text{m}$ 의 투명한 박막의 두께를 측정하는데 적합하고, Interference Microscope 방법은 기질(Substrate)의 두께를 정밀하게 측정하는 방법으로 표면거칠기(Surface Roughness) 평가에 이용된다.

Tolansky's Interferometer는 반사율이 높은 면과 기준면과의 높이 차이에 의해 형성되는 간섭무늬를 해석하는 방법으로서 불투명한 시료의 두께를 측정하는 직접적인 방법이다.

본 연구에서 채택하고자 하는 Digital Image Processing 방법은 CCD Camera와 Frame Grabber를 이용하여 시료 단면에 대한 사진을 찍어 디지털 이미지로 변환한 후, 사진분석을 하는 방법으로써 시료의 두께에 대한 가시화가 가능함으로써, 직관적인 판단이 용이할 뿐만 아니라, 카메라 렌즈의 선택에 따라 정량측정의 범위 및 오차를 줄일 수 있으며, 비접촉 측정방식이고, 복잡한 광학계 구성이 필요없다. 또 소형이고 깨지기 쉬운 박판의 물리량 측정에 용이하다. 따라서 간단한 원리도를 나타내면 Fig.2-1과 같다.

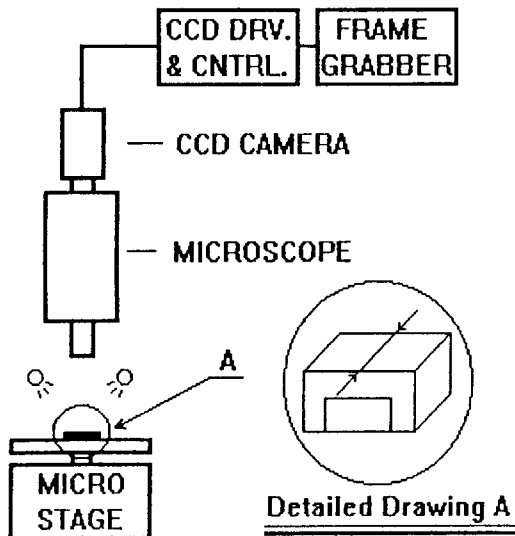


Fig. 2-1 Working principle of automatic thickness measuring system

### 2.2 이미지 평활화

평활화(Smoothing)기기는 근방관계 평균(Neighborhood Averaging)으로 간략히 말할 수 있으며, 이것은 공간영역(Spatial Domain)기술이라 할 수 있는데, 어떤 주어진  $M \times N$  영상정보  $f(x,y)$ 에서 어떤 주어진 점  $P$ 에 있는 모든 gray level 값들은 근방관계에 포함된 화소들의 휘도(gray level)값들을 영상정보  $g(x,y)$ 을 얻게 되는 것이다. 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$g(x,y) = \left(\frac{1}{M}\right) \sum_{(m,n) \in S} f(m,n) \quad (1)$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, m-1$$

$$y = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

집합  $S$ 는 점  $(x,y)$ 의 근방관계에서 점들의 좌표집합이고,  $M$ 은 정의된 점들의 총수를 의미한다. 여기서 정방격자 형태로 구성된 영상정보에서 임의의 한 점  $P$ 는 Fig 2-2와 같이 점  $P$ 에 인접한 8개의 점들로 싸여 있다. 이와같이 점  $P$ 에 인접한 8개의 점들을 점  $P$ 의 근방이라 하며 점  $P$ 와의 관계를 근방관계라 한다.

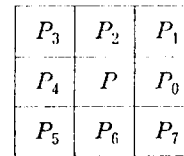


Fig 2-2. Neighborhood

### 2.3 미분 연산자

경계선을 검출하기 위한 화상처리의 개념은 대역 컨이점에서의 위치를 부각하고,반면에 불규칙한 밝기분포를 가진 성분은 감쇄 혹은 제거하는 Edge Operator가 요구된다. 예지라인을 부각시키는 화상처리기법에는 많은 이론적인 연구[8][9]와 실험적인 예[10]가 있지만 각기 이론의 장,단점과 화상처리 대상에 따라 일률적으로 적용하는것은 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 실험 대상으로 하고있는 반도체 부품의 미소두께 측정의 특성상  $3 \times 3$  필터형을 배제하고,가로축을 따라서 선형으로 미분하는 미분방식을 도입하고자 한다. 우선 가로축으로 배열된 화소의 일부 분을 기준점  $(X)$ 에서 좌측 화소값과 우측 화소값의 차이의 절대치를 합산하고 취하는 주변 화소의 수인 컨버루션수(Convolution)로 나눈 평균값  $NG(X)$  (New Gray Level)을 구한다.

$$NG(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |G(x+i) - G(x-i)| \quad (2)$$

$NG(X)$ 는 상위선이나 하위선에 놓인 노이즈(Noise)에 대하여 영향을 받지않고,단지 기준선 상에 놓인 노이즈에 대한 영향을 받으나,컨버루션수를 크게,하므로써 그

영향을 줄일 수 있으며, 반면에 서로 다른 Gray level을 갖는 인접된 두 대역의 경계선에서 NG(X)를 크게하는 효과가 있다. 더구나 킨버루션수가 클 수록 계산 시간이 비례한다는 것을 고려해야 한다. 식(2)에 의한 화소처리 방법을 이용한 선형 미분특성을 그림으로 나타내면 Fig.2-3과 같다.

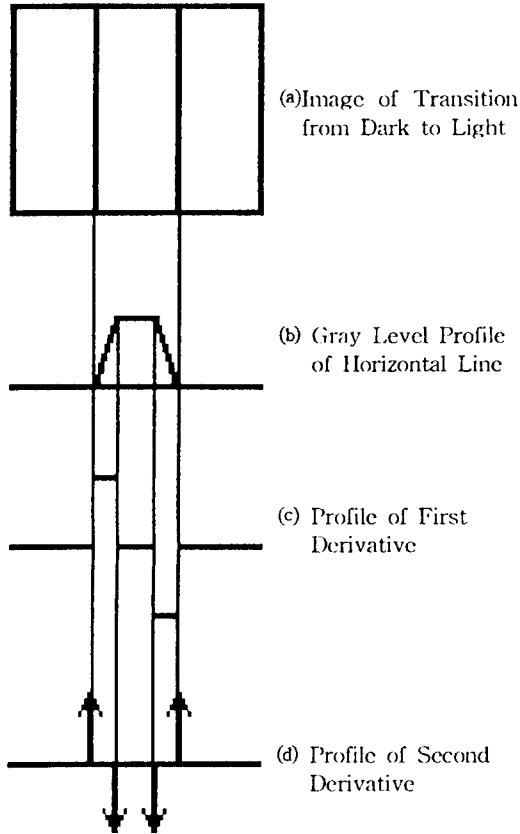


Fig.2-3 Elements of edge detectim by derivative operators.

화면에 표시된 화상 데이터의 수치계산을 위하여 Fig.2-3에서 나타난 이미지와 같이 좌표를 설정하여, 이미지 데이터의 좌측 상단을  $X = 0, Y = 0$ 으로 기준을 정하고 X축으로 0에서 511까지 그리고 Y축으로 0에서 479의 화소 좌표를 설정한다.

좌표표시는  $(Y, X)$ 로 나타내며,  $G(Y, X)$ 는 좌표  $(Y, X)$ 에서의 밝기값(Gray Level)을 표시한 세로 좌표의 크기가 480으로 표시되는 것은 Image Frame Grabber 회로 특성으로 진원 주파수 60Hz에서 나타난다.

#### 2.4 자동 정렬기구

부품공급장치(Parts Feeder System)는 일반적으로 무질서하게 놓인 부품을 규칙적으로 정돈해서 작업기계가 취급할 수 있는 위치까지 공급하는 장치이다.

대표적인 진동 보울 피더(Vibration Bowl Feeder)는 기초, 보울, 전자석 그리고  $120^\circ$  간격으로 경사지게 설치된 3개의 판스프링으로 구성되어 있다. 보울에는 공급된 부품이 담겨져 있으며, 이 부품은 보울 내부에 나선형으로 가공된 트랙(Track)을 따라서 위로 올라오면서 정렬이 되어지고 마침내 출구(Outlet)로 빠져 나가게 된다. 부품이 트랙을 따라 이동될 수 있는 이유는 3개의 판스프링과 전자석의 상호작용으로 이루어지게 된다. 부품의 자세 정렬기구는 작업기계가 작업을 할 수 있게 작업될 부품을 규칙적으로 정돈시켜 항상 일정한 방향으로 검사영역에 공급시키는 장치이다. 부품 자동 공급장치에서 부품의 자세 정렬기능은 매우 중요한 부분이며, 실제 응용에서 많은 에러가 발생하는 부분이다. 이와같이 부품의 형상에 따라 트랙이 다르게 설계되어야 하며 따라서 한 개의 보울피더로써는 한 가지 부품만 공급이 가능하다. Parts Handling의 자동화를 위해서는, 첫째 일반적으로 부품의 치수, 중량을 기초로 보울크기(Bowl Size)를 결정하고 부품의 형상에 부합되는 보울 종류를 선정해야 한다. 전형적인 보울크기의 일반식은 다음과 같다. 즉, ① 보울직경 = 공작물의 길이 X 5 ② 보울트랙 폭 = 공작물의 폭 X 0.85 ③ 보울트랙 피치 = 공작물의 높이 X 1.3 또 두번째 본체의 진폭에 대한 부품의 투입량, 중량등을 고려하지 않으면 안된다.

공작물의 물성에 대응하는 정렬방식을 살펴보면, Attachment 정렬방식, 광전자 정렬방식, 전수 정렬방식으로 나눌 수 있는데 Attachment 정렬방식은 부품의 외관상 특징 및 중심의 차이등을 이용하여 정렬하는 방식이고, 광전자 정렬방식은 광학검지, 전자판별에 따라 모든 부품의 정렬공급을 실현하는 방식이다. 또 전수 정렬방식은 최근에 개발된 기술로 광전자 정렬방식의 기술을 발전시킨것으로 마이콤제어(Micom Control)에 의한 독특한 자세 변환 장치에 따라 모든 부품을 필요한 자세에 맞게끔, 강제적으로 변환시키는 방식이다.

### III. 자동선별 및 계측장치

#### 3.1 설계 및 제작

소형물이나 박형물 워크(Work), 가벼운 워크, 얇히기 쉬운 워크, 형상이 매우 복잡한 워크, 변형되기 쉬운 워크, 또는 겹치는 워크등은 종래의 부품 공급기에서는 정렬이 곤란하여 반도체나 전자부품 업계에서 이것을 해소하는 부품 공급기가 강력히 요구되고 있다. 이는 높은 진동수와 작은 진폭을 발생하고 워크의 미소한 형상차, 중심차를 포착하여 고정밀도의 자세 판별이 가능해야 한다. 고정밀도의 자세판별이 가능한 부품공급기가 최근 개발되어 미소하나 고속 처리회가 시급히 요구되는 전자 및 반도체 부품에 가장 적합해 앞으로 많은 이용이 기대된다. 종래의 진동조건에서는 곤란한 미소 박형물 워크도 매우 유연하게 정렬을 할 수 있다. 최근 개발품들의 공급 가능한 최소 판두께는 0.03mm까지 가능하다.

본 연구의 감시대상물인 반도체부품의 판두께가 0.1 mm로 매우 얇고 또한 거친 연마 다듬질이 되어 있으므로 외주 면이 더욱 얇아져 워크와 워크가 밀면서 이송함으로 반드시 겹쳐 버리는 부품이기 때문에 매우 어려운 워크로써 그 실물의 시료를 확대하여 나타내면 Fig.3-1과 같다.

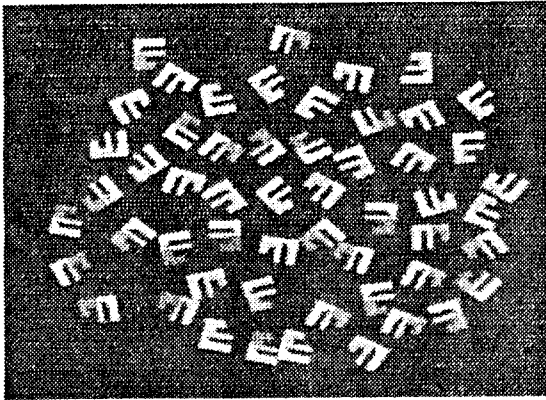


Fig. 3-1 Workpieces for experiment.

본 연구에서 고안한 자동선별 및 측정시스템의 흐름도는 Fig.3-2과 같고,제작한 사진을 나타내면 Fig.3-3과 같다.

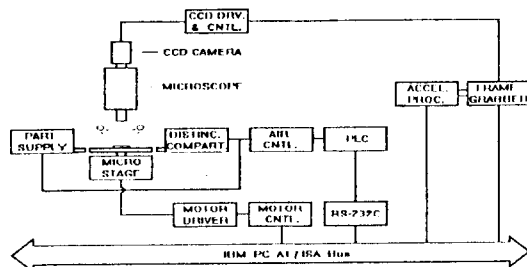


Fig. 3-2 Block diagram of automatic thickness measuring system

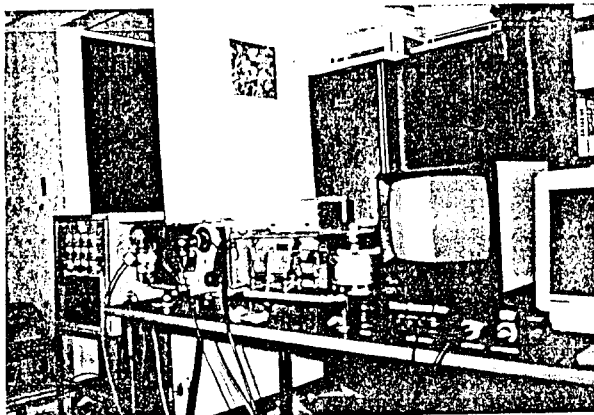


Fig. 3-3 Global photograph for automatic thickness measuring system

### 3.2 화상처리 프로그램

Frame Grabber에서 영상입력은 비디오신호의 동기를 일치시키기 위해 우선 입력 비디오신호의 횡방향 동기신호를 감지하도록 설정하였다. 또 Frame Grabber에서 비디오영상을 디지털영상으로 전환한 후 자체 Frame Grabber에 일시 저장하여 RAM Memory로 복사한 후 다음 입력영상을 대기토록 하였다. 또 입력모드는 입력 실행전에 Look-Up Table을 조정하도록 설정하였으며 연속된 비디오신호를 일정한 간격으로 여러 장의 영상을 입력,저장하기 위하여 다중입력이 가능케하였다. 이때 RAM Memory를 일시 영상 기억장소로 활용하였으며 8 Mbytes RAM이 설치되어 최대 28장의 영상을 입력 저장할 수 있다.

본 연구에서 개발한 영상획득 및 양 부, 재작업 판정 프로그램을 나타내면 Fig.3-4와 같다.

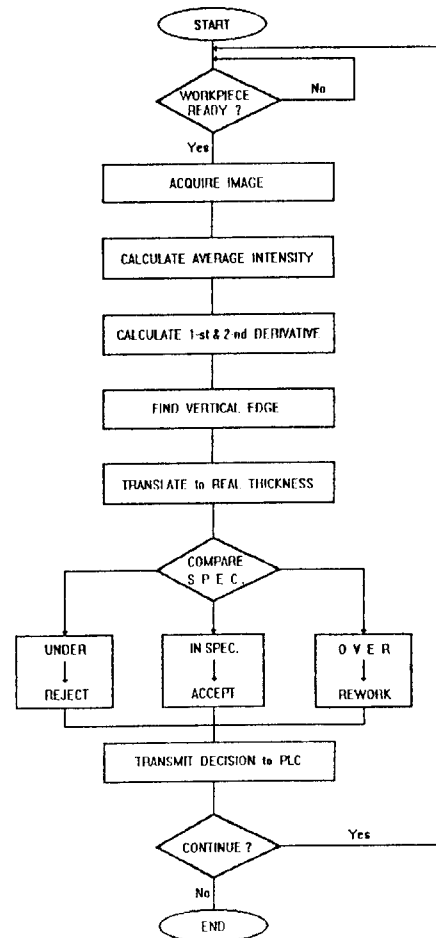


Fig. 3-4 Orders for acquirement of image and decision

## IV. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 원영상 히스토그램

영상의 휘도분포를 알기 위해서는 히스토그램(Histogram)을 조사하는 것은 필수적이다. 또한 이는 경계선 검출(Edge Detection), 영상강조(Image Enhancement) 등 여러가지 영상처리(Image Processing)의 중요한 지표가 되므로 입력영상에 대한 히스토그램을 작성하여 영상상태를 분석한다. Fig.4-1에 영상처리에 사용할 원영상을 보이고, 원영상에 대한 중요한 정보를 갖고있는 라인 프로파일을 나타내면 Fig.4-2와 같다. 이 원영상에 대한 라인 프로파일을 분석함으로써 경계선을 손쉽게 검출할 수 있다.

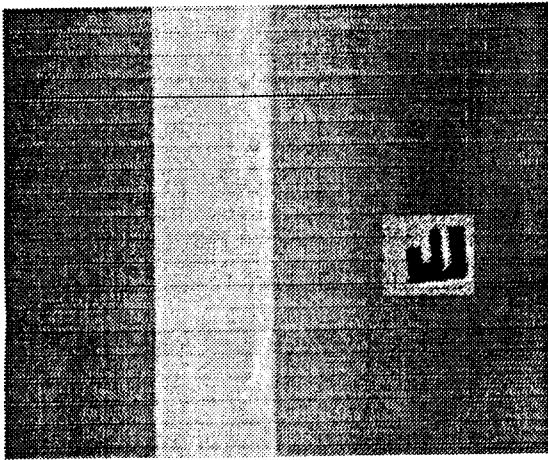


Fig. 4-1 The original image used in the image processing

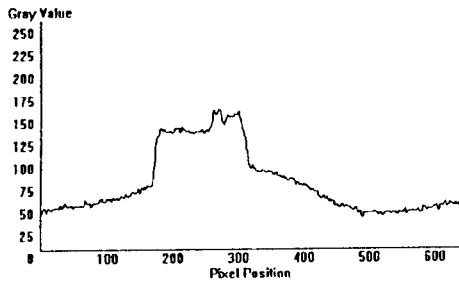


Fig. 4-2 Line profile for the original image

### 4.2 영상강조

영상의 입력상태가 양호하지못한경우 영상상태를 개선하기위해 여러가지 여과과정(Filtering)을 거쳐 영상강조를 행하는데 많은 방법들이 사용되고 있다.[7] 즉 Gray Scale Modification, Lowpass Filtering, Highpass Filtering, Out-Range Pixel Smoothing, Adaptive Filtering 등의 기법이다.

Fig.4-3에서 처럼 휘도(Gray Level)가 한쪽으로 치우친 경우 이를 보완하여 휘도치가 전 영역에 걸쳐 고루 분포하도록하여 영상이 뚜렷하게 나타나도록 한다. 본 연구에서는 영상의 대조도(Contrast)를 높여 주기위해 앞에서 언급한 평활화기법을 채택하였다. 평활화된 영상의 라인 프로파일을 나타내면 Fig.4-4와 같다.

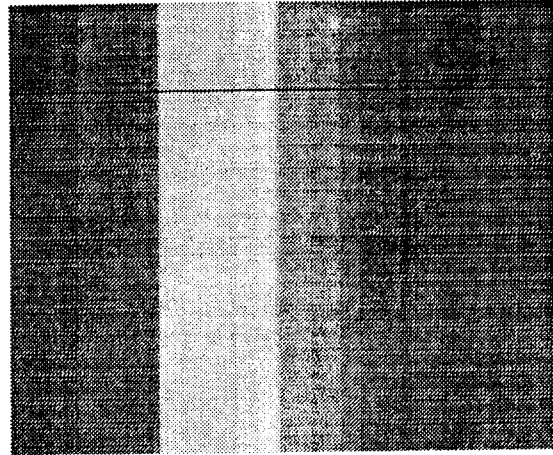


Fig. 4-3 A smoothed image

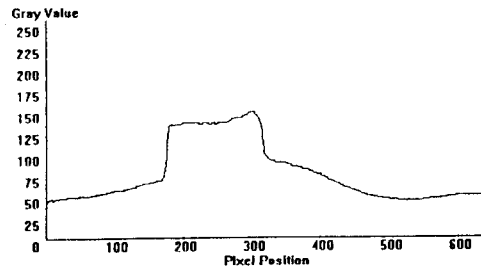


Fig. 4-4 The Lin profile after image processing

### 4.3 연산처리 및 결과

가로축을 따라서 선형으로 미분하는 미분방식을 채택하여 1차 미분 및 2차 미분을 통한 결과 이미지와 라인 프로파일을 나타내면 Fig.4-5와 Fig.4-6과 같다.

자동 측정 결과 이미지에 대한 각종 정보를 원화상위에 나타내면 Fig.4-7과 같은데 즉, 측정 픽셀수, 측정값, 샘플명, 시료배율, 총합배율, 분해능, 사용카메라 종류, 측정속도등을 나타낸다.

### 4.4 분해능평가

어떤 개발된 측정시스템을 평가할 때 측정시스템으로부터 얻은 데이터에 대하여 어느 정도까지 신뢰하는 것이 좋은가는 대단히 중요한 문제이다. 이를 평가하는 기

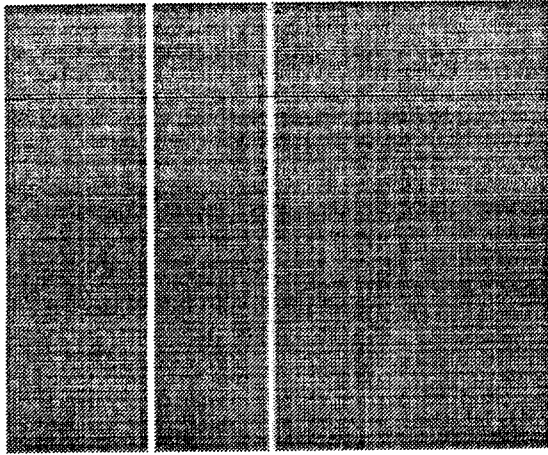


Fig. 4-5 The processing image by derivative operators

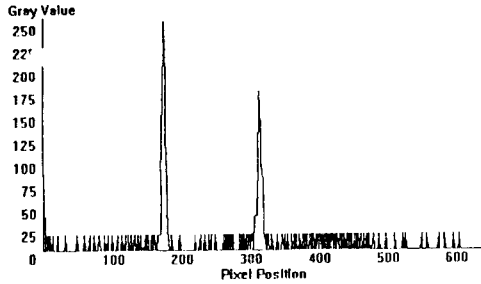


Fig. 4-6 The line profile after derivative operators.

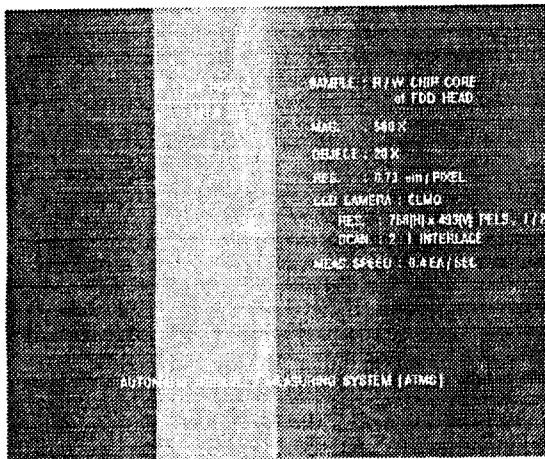


Fig. 4-7 The representation of the experimental result

준이 정밀도(Accuracy)이며, 일반적으로 오차(Error)의 대·소에 의해 결정된다. 즉, 그 개발시스템이 최적의 상태로 운용될 때 그 측정범위내의 각 위치에 대하여

동일한 방법으로 측정하여 얻어진 측정값의 최대 및 최소치로 나타낼 수 있다. 그렇지만 소요조건을 만족한 상태에서 그 최대의 측정오차를 표시함으로 이 이상의 오차는 이러나지 않도록 보정해야 한다.

측정기의 민감한 정도를 정량적으로 표시하는 방법에는 단위 눈금의 변화량으로 표시하는 방법이 있는데 이는 최소 눈금의 단위로 표시하는 방법을 말하는 것으로 본 연구에서 개발한 자동 두께측정 장치의 감도(Sensitivity)는 Fig. 4-8에서 실험한 바와같이 x방향으로  $0.73 \mu\text{m}/\text{pixel}$  정도이다.

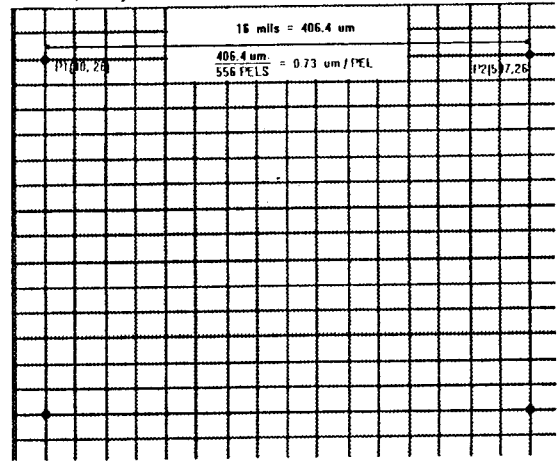


Fig. 4-8 The sensitivity of measuring system

#### 4.5 비교측정 결과

본 연구에서 개발한 비접촉 자동 두께 측정시스템(ATMS)의 적용실험을 위해 수작업에 의한 기존의 두께 측정기(SIP 305M)와 비교분석한 결과를 살펴보면 Table 4-1에 나타난 것과 같이 표준편차( $2\sigma$ )  $\pm 0.5$  정도로 상당히 근접함을 보여주고 있다. 이는 기존의 정밀 두께 측정기의 신뢰도와 잘 일치함으로 본 측정시스템의 정밀 및 정확도가 믿을 만 하다는 것을 입증해 준다.

이 측정결과를 그래프로 나타내면 Fig. 4-9와 같고, 샘플 50, 100, 150, 200, 250  $\mu\text{m}$ 에서 각각 잘 일치함을 알 수 있다.

측정시스템의 생산성을 평가하기 위해 총 샘플링 수를 4232개로 랜덤하게 잡고 요구사양(Spec.  $98 \pm 10 \mu\text{m}$ )에 맞는 검사를 실시해본 결과 양품이 3453개로 전체의 81.6%를 차지하고 불량품 427개로 전체의 10.1%, 재작업량 352개로 8.3%를 차지했다. 종전의 수작업에 의한 재작업량 선별이 불가능해 불량품 손실로 빠지는 부분을 재작업으로 분류함으로 생산원가·절감효과를 8.3% 중대시킬 수 있었다. 이 결과를 도표로 나타내면 Table 4-2와 같다.

또한 자동선별시스템의 선별능력은 초당 0.4개로 총소요시간 2시간56분의 4232를 자동 측정 및 양·부, 재작업 선별이 가능함으로 수작업으로 걸리는 시간 초당 약 0.1개정도로 11시간 45분에 비해 소요시간면에 있어서도 4배의 절감효과를 나타내고 있다.

Table 4-1 Thickness comparison of the ATMS vs. the SIP 305M

UNIT :  $\mu\text{m}$

SAMPLE	SIP 305M	ATMS	$2\sigma$
# 1	50.3	50.4	0.3
# 2	101.2	100.8	0.4
# 3	150.8	150.6	0.4
# 4	202.6	202.9	0.5
# 5	251.4	251.2	0.5

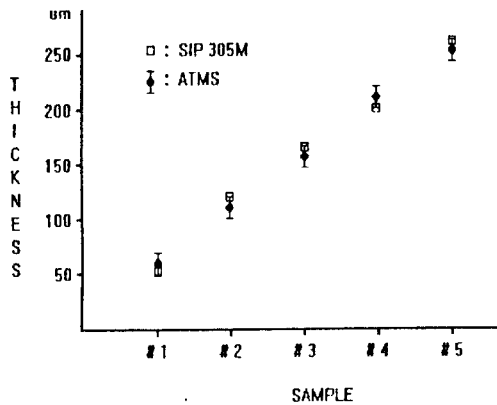


Fig. 4-9 Graph of the ATMS vs. the SIP 305M

Table 4-2 Experimental result for production rate

Experimental condition	Results				
	Accept	Reject	Rework	Insp. Time	Throughput
Total number of sample: 4232EA Specification: $98 \pm 10 \mu\text{m}$	3453EA (81.6%)	427EA (10.1%)	352EA (8.3%)	2 hr 56min.	0.4EA/sec.

## V 결 론

본 논문은 취성이 강한 미소 반도체부품을 대상으로 한 생산 자동화 시스템 개발에 관한 연구로써 부품의 자동이송장치, 신속하고 신뢰할 수 있는 자동측정시스템 구성 및 자동 선별기능을 가미한 단위기계 자동화에 대한 연구이다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미소 부품의 자동 검사시스템을 구축하였다.
2. 단순반복작업으로 수행하던 방식을 탈피하여 비접촉방식에 의한 검사시간을 단축하여 생산성을 향상시킬 수 있었다. (0.4 ea/sec)
3. 재작업을 지시할 수 있으므로 손실을 줄이고 원가 절감 효과를 거둘 수 있었다.
4. 수작업으로 인한 측정위치 불안정을 개선함으로써 일관성을 기할 수 있다.

## 참고문헌

1. Tlustý, J., "Testing of Accuracy of Machine Tools", UCRL-52960-suppl.1, McMaster University, Canada, 1980
2. Frost-Smith, E.H. et al., "Optimization of the Machining Process and Overall System Concepts", Proc. MTIRA Conference on A.C. of Machine Tools,
3. Groover, M.P., Zimmers, E.W., Jr., "CAD/CAM, Computer-Aid Design and Manufacturing", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1984
4. Smith, W., "Modern Optical Engineering", McGraw-Hill, 1966
5. Yo. I. Ostrovsky, "Interferometry by Holography", Springer-Verlag, Berlin, 1980
6. Hosaka, S., Hasegawa, T., Hosoki, S. and Takata, K., "Dynamic Observation of Si(111) Surface using a Fast Scanning Tunneling Microscopy", Appl. Phys. Lett. 57(2), pp.138-140
7. Rafael C. Gonzalez and Paul Wintz, "Digital Image Processing", Addison Wesley, 1987, pp.2-40
8. Dana H. Ballard and Christopher M. Brown, "Computer Vision", Prentice-Hall INC., 1982, pp.17-62
9. Chow, C.K. and Kaneko, T., "Automatic Boundary Detection of the Left Ventricle in Cineangiograms", Comp. and Biomed. Res., Vol.5, 1972, pp.388-410
10. 김영일, "선삭가공에서 디지털 이미지 프로세싱을 이용한 자동 공구마모 측정 시스템 개발", 숭실대학교 박사학위논문, 1993