

## 레이저센서를 이용한 비접촉식 두께자동측정기 개발

조경철\*, 김수연\*\*, 신기열\*\*,#

\*한국섬유기계연구원, \*\*영남대학교 공과대학 기계공학부

### Development of Automated Non-contact Thickness Measurement Machine using a Laser Sensor

Kyung-Chul Cho\*, Soo-Youn Kim\*\*, Ki-Yeol Shin\*\*,#

\*Korea Textile Machinery Research Institute, \*\*School of Mechanical Engineering, Yeungnam UNIV.  
(Received 31 October 2014; received in revised form 23 February 2015; accepted 16 March 2015)

#### ABSTRACT

In this study, we developed an automated non-contact thickness measurement machine that continuously and precisely measures the thickness and warp of a PCB product using a laser sensor. The system contains a measurement part to measure the thickness in real time automatically according to the set conditions with an alignment supply unit and unloading unit to separate OK and NG products. The measurement machine was utilized to evaluate the performance at each step to minimize measurement error. At the zero setting for the initial setup, the standard deviation of the 216 samples was determined to be  $5.52\mu\text{m}$ . A measurement error of 0.5mm and 1.0mm as a standard sample in the measurement accuracy assessment was found to be 2.48% and 2.28%, respectively. In the factory acceptance test, the standard deviation of 1.461mm PCB was measured as  $28.99\mu\text{m}$ , with a  $C_{pk}$  of 1.2. The automatic thickness measurement machine developed in this study can contribute to productivity and quality improvement in the mass production process.

**Key Words** : Thickness Measurement(두께측정), Non-contact(비접촉), Laser Sensor(레이저센서), Statistic Process Control(통계적공정관리), PCB(인쇄회로기판)

## 1. 서 론

인쇄회로기판(Printed Circuit Board; PCB) 산업은 어려운 산업환경에도 불구하고 40여년의 역사를 자랑하는 국내 부품산업의 핵심 축이다. 정보통신 분야와 직결되는 첨단제품의 필수요소인 PCB는 기계, 자동차, 항공기, 선박을 비롯하여 반도체, LCD의 핵심부품으로 수출 주도형의 고부가 제품이다. 최근 반도체 및 컴퓨터 기술의 눈부신 발전은

개인용 컴퓨터 및 인터넷, 휴대용 전화기 등의 광범위한 보급으로 이어졌고, 이는 곧 정보화 사회로의 전초전이 되었다. 이러한 추세에 발맞추어 전자기기들의 소형화, 경량화가 급속히 추진되고 있다. 전자기기의 생산에 있어서 신뢰성 있는 제품의 경제적인 생산이 중요시되고 있으며, 이를 위한 전자 시스템의 구성 모듈인 PCB를 조립한 후, 테스트하는 공정은 필수적인 과정이라 할 수 있다.

# Corresponding Author : [shinky@ynu.ac.kr](mailto:shinky@ynu.ac.kr)

Tel: +82-53-810-3060, Fax: +82-53-810-4627

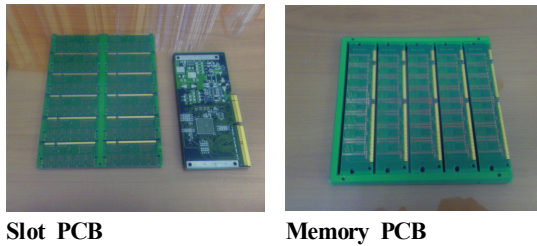


Fig 1. Module PCB array samples.

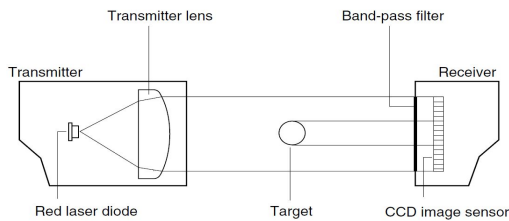


Fig. 2 Basic concept of CCD laser micrometer (Keyence CCD model).

Fig. 1과 같은 메모리모듈PCB 제품은 원소재인 CCL로부터 노광, 현상, 에칭, 박리, 도금, 인쇄, 검사 등 수십개의 공정을 거쳐서 최종 PCB제품으로 완성되어진다. 완성된 PCB에는 메모리칩이 실장되고 하나의 완제품 메모리모듈이 되어 다른 제품들과 조합하여 최종전자제품으로 탄생하게 된다. 이 과정에서 PCB부품의 조립 시 도금된 연결부위가 컨택트에 원활하게 삽입되지 못하거나 삽입 후 접촉불량으로 기기의 문제가 자주 발생하게 되는 데, 이는 PCB를 제조하는 과정에서 컨택트와 결합되는 단자부위의 도금두께나 제품의 휨에 의한 불량요인에 기인한다. 지금까지 검사공정에서 두께나 휨량의 측정없이 바로 출하하게 되는 것은 PCB의 두께나 휨량을 측정 자체가 어렵고 이들 공정을 자동화하기가 어려웠기 때문이다. 또한 출하공정의 전수검사에서 발생하는 불량품의 처리방법에 대한 공정관리 기준이 업체마다 다르고 표준화되어 있지 않기 때문에 관리상의 문제점으로 자동화가 어려웠던 것이다.

본 연구는 최근 반도체 및 컴퓨터 기술의 눈부신 발전을 통해 그 수요가 급증하고 있는 PCB의 양산공정에서 제품의 두께나 휨량을 정밀하게 연속적으로 측정하는 두께자동측정기를 개발하는데

그 목적이 있다. 이를 위해 레이저 센서를 이용한 비접촉식 두께측정기술을 개발하고 연속제조공정에서 결함여부를 자동판별하기 위한 두께자동측정 시스템을 설계, 제작하였다. 개발된 측정장비는 측정 및 검사성능을 평가하여 측정데이터 및 제품 검사결과에 신뢰성을 확보하여 전수검사 공정을 구성하는데 적용하였다. 지금까지 검사공정에서 자동으로 휨량을 측정하여 불량유무를 검사하는 장비가 개발된 사례가 없었고 측정값에 대한 신뢰도를 보장하기 위한 체계적인 연구와 통계적 공정관리 기법을 적용한 것은 측정장비의 개발 및 공정자동화 연구에 좋은 사례가 될 수 있을 것이다.

## 2. 두께측정 이론

### 2.1 센서 및 측정 원리

본 연구에서는 PCB제품의 휨량을 비접촉으로 측정하는 장비를 개발하여 제품의 결함여부를 자동판별하고 출하전수공정의 자동화를 이루고자 한다.

측정센서의 경우 기존의 LVDT를 이용한 직접 측정이 불가능한 휨-측정을 비접촉식 레이저 센서의 광원을 이용하여 측정하고자 한다. 레이저 광원의 경우 측정반응속도가 빨라 대량생산공정에 적합하며 제품의 이송과정에서도 고속검사가 가능한 장점이 있다<sup>[1]</sup>. 하지만 측정대상에 따라 광투과 특성이 다르게 나타나므로 제품의 종류와 측정정도, 광투과 특성에 따라 적합한 레이저 광원과 측정방식을 선정하여야 한다<sup>[2,3]</sup>. 측정방식은 레이저 광원을 주사하여 물체에 의해 생기는 그림자 부분의 시간을 이용하여 연산하는 방식과 레이저광을 물체에 조사하여 물체에 의해 생기는 그림자 부분을 CCD 이미지 센서로 측정하는 방식이 있다. 본 연구의 대상인 PCB제품은 광투과성이 낮고 최대 두께가 3mm이하로 Keyence사의 VG laser sensor를 이용한 CCD 방식을 채택하였다. Fig. 2는 VG sensor를 이용한 CCD 레이저 마이크로미터의 측정원리를 설명한 것이며 측정에 사용된 레이저 센서의 주요사양은 Table 1에 요약하였다.

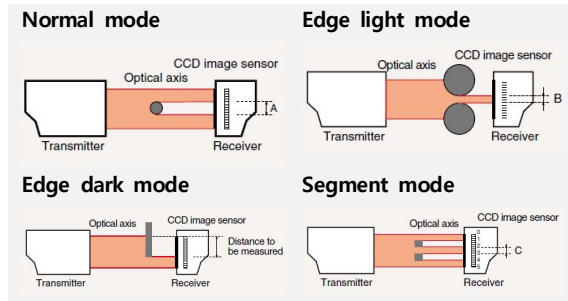
**Table 1 Specification of laser sensor with controller. (VG-036-OS Sensor and VG-301 Controller)**

Item	Specification
Repeatability	5 $\mu$ m
Linearity	$\pm 0.1\%$ of F.S (30mm)
Resolution	Min. 1 $\mu$ m(OS)
Range	Max. 35mm
Distance	Max. 300mm
Response time	3.9ms
Sampling rate	780times/sec

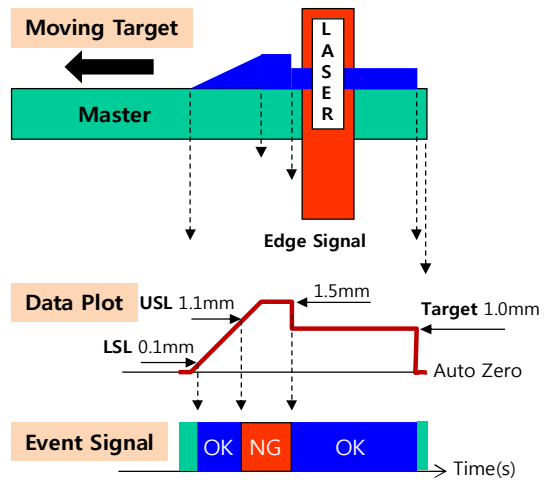
## 2.2 비접촉식 두께측정 방법

Fig. 3에는 CCD 방식의 레이저를 이용한 비접촉식 두께측정 원리와 측정방법을 종류별로 설명하였다. 측정원리는 투광기인 레이저 센서에서 가시광 평행 레이저를 주사하고 CCD 이미지 센서를 내장한 수광기에서 감지된 신호를 분석하여 광축에 있는 측정대상물의 위치를 파악하는 것이다. 수광기 내에는 CCD 이미지 센서가 내장되어 있으며 수광기 위쪽부터 1~5000bit의 순서로 배치되어 있다. 측정시 레이저 빔이 수광되는 부분과 대상물에 의해 그림자로 차광되는 부분이 생기게 되는데 그 경계면을 엣지(Edge)라고 정의하며 엣지에 의해 구분된 영역에 따라 다양한 측정 모드(노멀, 엣지 라이트, 엣지 다크, 세그먼트)를 선택할 수 있다.

Fig. 4에서는 본 연구에서 측정대상인 PCB의 두께나 휨을 측정하기 위한 방법을 도식화한 것이다. 즉, 엣지 다크 모드에서 마스터 기준면 위를 제품이 지나갈 때 높이에 따라 투과되는 레이저 주사량을 측정하여 제품의 높이를 측정하고 설정된 범위에 따라 양불을 판별하도록 구성하는 것이다. 최종검사공정에서의 두께나 휨측정이 필요한 PCB제품의 종류는 다양하지만 모듈 PCB의 경우 1.0~1.27mm 두께의 제품으로 접촉단자대의 두께 허용공차는 일반적으로 100 $\mu$ m 이하로 규정(+50/-4, DDR2 FBDIMM, 240 pin 60 ball Green Package, Nanya, Taiwan)하고 있다. 제품의 휨량에 대하여서는 특별한 규정은 없으나 두께와 동일하게 100 $\mu$ m 이하로 관리하는 것이 일반적이다.



**Fig. 3 Measurement concept with various operating modes with respect to the detecting target.**



**Fig. 4 Non-contact thickness measurement concept by using laser sensor.**

## 3. 측정시스템의 설계 및 제작

### 3.1 측정시스템의 구성

레이저 센서를 이용한 비접촉식 자동 두께측정 장치는 표본검사를 위한 수동 장비와는 달리 검사 공정 완전자동화를 통해 생산성을 향상하고 제품의 전수검사를 통해 품질의 신뢰성을 확보하기 위한 것이다. 측정시스템의 구성은 제품의 자동공급을 위한 정렬 공급부와 설정된 조건에 따라 실시간으로 두께를 자동측정하는 측정부, 측정된 DATA를 통해 양품과 불량을 판별, 처리하고 평

균, 표준편차 등 공정능력을 분석하기 위한 PC 제어부와 양불로 선별된 제품을 자동으로 분류하는 배출부로 구성된다. 본 연구에 사용된 측정방법은 Fig. 3의 측정모드 중에서 엣지 다크 모드(Edge dark mode)를 선택하였으며 제품을 측정부 위에 올려놓고 양쪽에 투광기와 수광기를 설치한 측정부를 지나갈 때 발생하는 센서의 측정량에 따라 횡량을 측정하고 표준시편의 기준값에 대한 허용 오차범위에 따라 양불로 판별하게 하였다. 엣지 다크 모드에서는 마스터위에 제품이 있을 때와 없을 때 레이저 투과량의 차이로 제품의 횡을 포함한 두께를 그림자로 측정하는 방식으로 Fig. 3에 나타난 센서를 상하방향으로 뒤집어 설치하여 사용하였다. Fig. 4에서는 제품형상을 도식화하여 측정부를 지나갈 때 센서에서의 측정값과 양불판별 신호를 설명한 것이다. 제품이 레이저센서 측정부를 지나갈 때 영점 기준면에서 제품의 형상에 따라 발생하는 그림자의 양으로 두께를 측정하게 된다. 시편의 규격을 1.0mm로 설정하고 규격상한값(USL)을 1.1mm로 설정하였을 때 측정값이 그 값을 초과하게 되면 불량제품으로 감지하여 양품과 분리하여 처리하도록 장치를 구성하였다. 규격하한값(LSL)은 제품 유무를 감지하는데 사용하며 최소두께를 감지할 수 있도록 그 값을 적절히 설정하게 하였다. Fig. 5는 측정시스템의 구성과 신호 체계를 설명한 것이다.

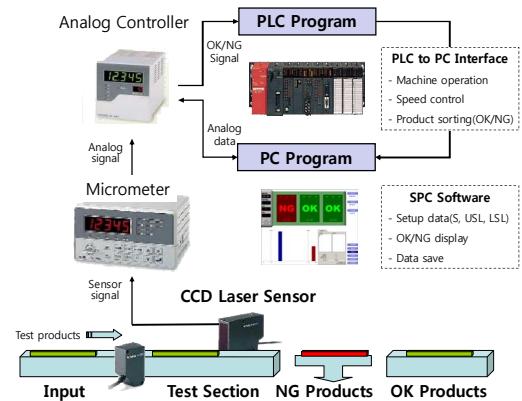


Fig. 5 Configuration diagram of non-contact thickness measurement system

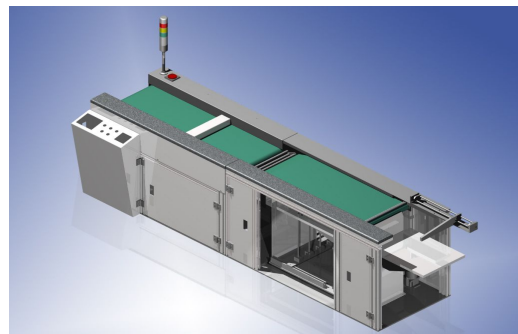


Fig. 6 3D drawing of thickness measurement system

### 3.2 두께자동측정기 설계 및 제작

두께자동측정기는 크게 공급검사부와 배출적재부로 나눌 수 있다. 제품투입부에 제품이 놓여지면 벨트를 따라 이동을 하게 된다. 이때 제품검사부를 지나면 자동으로 검사를 실시하고 양불판정을 하게 된다. 양품인 경우에는 벨트를 따라 위쪽으로 이동하여 양품적재부에 적재가 되고 불량품인 경우 벨트 아래쪽으로 이동하여 불량품적재부에 적재가 된다. Fig. 6과 7은 비접촉식 두께자동측정기의 3차원 설계도와 장비의 각 부분의 제작 실물사진을 나타낸 것이다. Fig. 7에 우측하단의 실제 제품의 측정부 위치에서 제품의 위치편차나 벨트진동 등의 측정오차요인을 줄이기 위해 측정부 벨트 아래에 진공흡착부를 추가로 설치하였다.

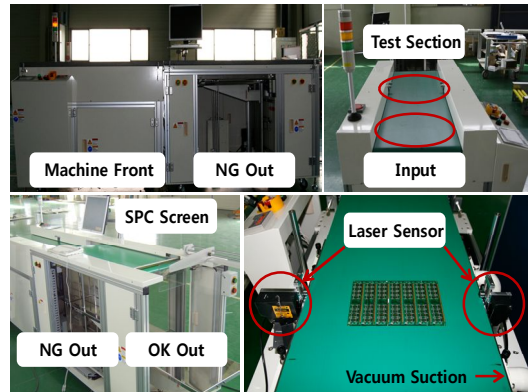


Fig. 7 Main components of non-contact thickness measurement system using a laser sensor.

## 4. 성능평가 및 공정능력 분석

### 4.1 시운전 및 초기설정

이상의 측정원리를 통해 제작된 측정기는 시운전을 통해 제품이송과정에서의 위치, 진동 등의 외란요소를 확인하고 마스터 테이블의 반복정밀도를 확인하여 우연원인(불가피원인)에 의한 품질변동요인을 최소화하여야 한다<sup>[4]</sup>. 특히 제품이송용 컨베이어는 일정속도로 구동되는 모터로 이송되지만 구동 중 벨트의 장력변화와 외부 진동 등에 의한 진동이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 측정부 컨베이어 벨트 하부에 스테인레스 재질의 매끈한 표면을 가진 진공탱크를 설치하고 벨트와의 접촉부에 다수의 구멍을 뚫어 진공흡착부를 설치하여 외란의 요소를 최소화하고자 하였다. Fig. 8은 진공흡착모듈의 개념을 설명한 것이다. 시운전과정에서 진공흡착기능을 사용하기 전에 센서의 측정값의 편차가 Fig.9 (a)에서 보는 것처럼 약  $\pm 200\mu\text{m}$  정도로 크게 발생하였다. 하지만 측정부 아래에 진공흡착부를 설치 후에 측정값은 Fig.9 (b)에서 보는 것처럼 약  $\pm 10\mu\text{m}$  이하로 감소하며 안정적인 값으로 측정하는 것을 확인할 수 있었다.

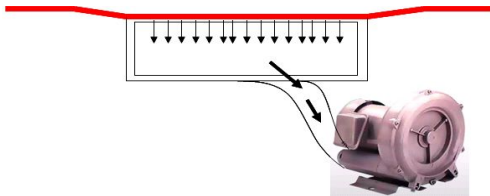
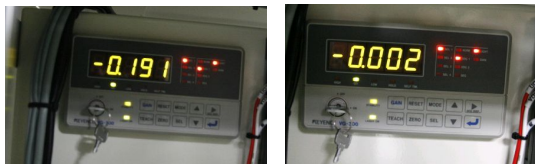


Fig. 8 Anti-vibration concept design with vacuum unit.



(a) Without vacuum (b) With vacuum

Fig. 9. Vacuum effect for thickness measurement.

### 4.2 영점 및 반복측정 성능평가

시운전과정에서 초기설정 조건을 확인한 후 먼저 영점측정값의 반복정밀도를 확인해 보았다. 컨베이어에 제품이 없이 이송하였을 때 레이저 센서에서의 측정값을 3회 측정하고 그 값을 분석해 보았다. Fig. 10은 센서의 Full Scale 값과 측정부의 영점측정값을 나타낸 것이며 허용오차  $\pm 15\mu\text{m}$  범위에서 3회 반복측정한 결과 불량감지가 나오지 않았다. 측정값 216개의 표본값을 분석한 결과를 Fig. 11에 나타내었으며 그 결과 측정 평균값 (Average: AVR) 29.32725mm, 최대편차가  $20\mu\text{m}$ , 표준편차(Standard Deviation: S.D.)가  $5.52\mu\text{m}$ 로 반복정밀도가 매우 양호한 것으로 나타났다.

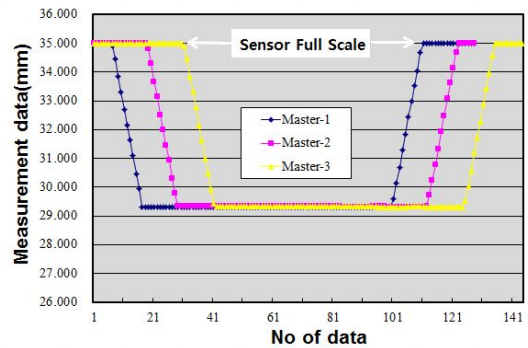


Fig. 10 Measurement data for the repeatability test.

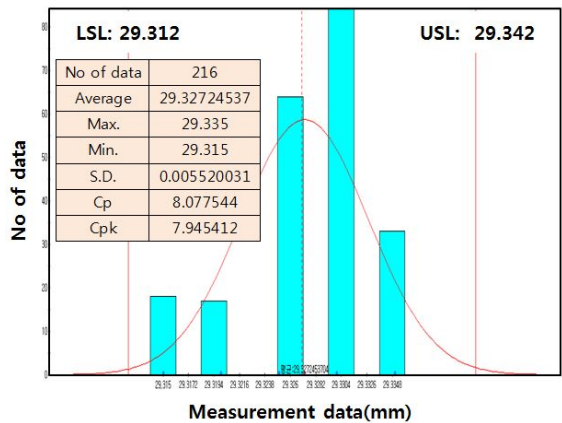
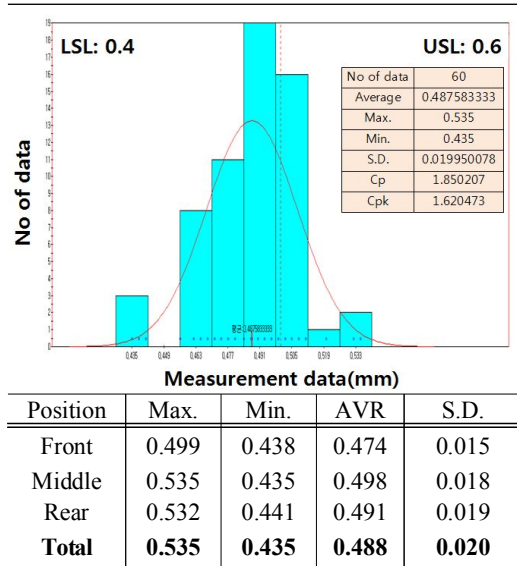
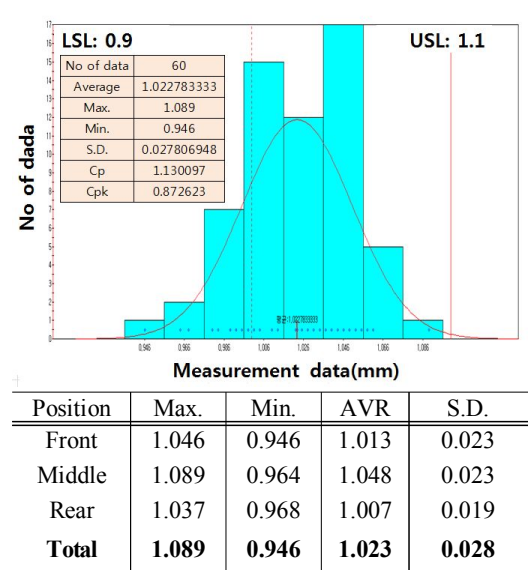


Fig. 11 Normal distribution of thickness measurement data for the repeatability test.

**Table 2 Accuracy test data analysis(0.5mm).**



**Table 3 Accuracy test data analysis(1.0mm).**



### 4.3 표준시편의 측정 성능평가

측정기의 제품검사 성능을 평가하기 위해 2가지 서로 다른 두께의 표준시편을 이용하여 이를 반복측정하고 그 결과를 분석해 보았다. 표준시편은 두께가 각각 0.5mm와 1.0mm인 스틸형 표준게이지블럭(Mitutoyo, Model 516-960-10)을 사용하였다.

표준시편 측정에서는 각 시편을 3가지의 다른 측정위치, 전면(Front), 중앙(Middle), 후면(Rear)에 놓고 20회 씩 총 60회의 측정값을 표본데이터로 획득하였다. Table 2와 3은 각 시편의 측정값과 분석결과를 나타낸 것이다. 제품검사에서는 영점 측정에서 확인된 평균값을 영점으로 설정하여 측정된 값이 바로 제품의 힘을 포함한 두께 값이 되도록 하였다. 두께 0.5mm시편의 측정값에 대한 평균은 0.488758mm, 측정오차 -12.4 $\mu$ m, 표준편차 19.95 $\mu$ m로 나타났으며, 두께 1.0mm 시편의 경우 평균 1.02278mm, 측정오차 +22.78 $\mu$ m, 표준편차 27.8 $\mu$ m로 나타났다. 표준시편에 대한 평균값의 측정정밀도를 확인해 보면 0.5mm 시편에서 2.48%, 1.0mm 시편에서 2.28%의 오차범위를 가지는 것을 확인할 수 있다. 측정장비의 검사규격을  $\pm 100\mu$ m

범위로 설정할 경우 표준시편 측정에서 나타난 오차범위는 검사공정에서 충분히 수용할 수 있는 범위에 있다고 판단하고 제품의 영점 교정없이 실제 PCB 제품을 대상으로 측정성능을 평가해 보았다. 하지만 측정장비의 노후화에 따른 컨베이어 벨트의 평탄도 변화 등에 따라 측정오차가 크게 발생할 수 있으며 이를 줄이기 위해서는 정기적인 영점측정과 표준시편을 이용한 검교정을 통해 사용자는 부품교체 등의 조치를 통해 장비의 측정성능을 유지할 필요가 있다.

### 4.4 PCB 제품측정 성능평가

영점측정과 표준시편을 이용한 교정작업을 통해 장비의 성능과 측정센서의 변동특성을 확인해 보았다. 이제 실제 수작업에서 양품으로 판별한 PCB제품을 측정대상으로 두께측정기의 제품측정 성능과 연속검사과정에서의 공정능력을 분석해 보았다<sup>[5]</sup>. 공정능력(Process Capability,  $C_p$ )은 기피원인이 제거되고 우연원인만이 품질변동을 주는 경우에 생각할 수 있는 공정상의 품질분포의 정도를 의미하는 것으로 식(1)과 같이 정의한다.

$$C_p = \mu \pm 3\sigma \equiv (99.73\%) \quad (1)$$

여기서  $\mu$ 는 평균,  $\sigma$ 는 표준편차를 의미한다. 이 값은 공정이 안정한 상태, 즉 관리상태에 있을 때, 그 공정이 얼마나 균일한 품질의 제품을 생산할 수 있는지를 나타내는 공정고유의 능력을 의미한다. 따라서 공정능력평가전 공정이 관리상태에 있어야 한다. 왜냐하면 공정능력의 결과가 미래의 결과까지도 예측할 수 있는 정보를 주기 위함이다. 이를 지수화한 것이 공정능력지수(Process Capability Index, PCI ;  $C_p$  or  $C_{pk}$ )이며 양쪽 규격이고 치우침이 없는 경우 식(2), 양쪽 규격이고 치우침이 있는 경우 식(3)으로 정의하여 나타낸다.

$$PCI = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = C_p \quad (2)$$

$$C_{pk} = (1-K) \frac{USL - LSL}{6\sigma} = (1-K)C_p \quad (3)$$

여기서 USL은 규격상한(Upper Specification Limit), LSL은 규격하한(Lower Specification Limit), K는 치우침정도를 나타내며 치우침정도는 규격상하한 값의 중앙값에 대한 중앙값과 산포평균의 차이로 계산되며 측정값에 치우침이 없는 경우 치

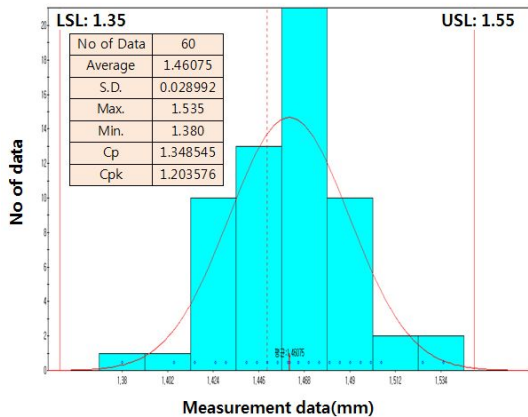


Fig. 12 PCB thickness measurement data and result of statical process capability analysis.

우침정도가 0이 되고  $C_p$ 와  $C_{pk}$ 는 같은 값이 된다.

PCB제품의 측정데이터와 분석결과는 Fig. 12에 요약하여 나타내었다. 측정결과 60개의 PCB 제품에 대한 측정값의 평균은 1.46075mm으로 나타났으며 표준편차는 28.992 $\mu$ m으로 기존의 표준시편 측정값과 유사한 정도의 정규분포 특성을 가지는 것을 알 수 있다. 최대편차가 155 $\mu$ m로 크게 나타나는 것은 제품자체의 두께편차를 포함한 것에 기인한 것으로 볼 수 있으며 검사규격의 기준값인  $\pm 100\mu$ m의 범위를 벗어나는 제품도 검출되지 않았다. 또한 측정데이터의 통계분석에 의한 공정지수값의 계산에서도  $C_p=1.349$ ,  $C_{pk}=1.204$ 으로 나타나 공정능력이 우수한 것으로 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구는 PCB제품의 두께나 힘량을 정밀하게 연속적으로 측정하는 두께자동측정기를 개발하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 레이저 센서를 이용한 비접촉식 두께측정기술을 개발하고 연속제조 공정에서 결함여부를 자동판별하기 위한 자동측정 시스템을 설계, 제작하였다. 두께자동측정시스템은 설정된 조건에 따라 실시간으로 두께를 자동측정하는 측정부를 중심으로 제품의 자동공급을 위한 정렬 공급부, 측정된 DATA를 통해 양품과 불량을 판별 처리하고 측정자료의 통계적 공정능력을 분석하기 위한 PC 제어부와 양부로 선별된 제품을 자동으로 분류하는 배출부로 구성하였다.

개발된 측정장비는 측정오차를 최소화하기 위해 각 단계별로 성능평가를 수행하였다. 초기설정을 위한 영점측정에서 216개 측정표본에 대한 표준편차가 5.52 $\mu$ m로 반복정밀도가 매우 양호하게 나타났다. 또한 표준시편을 이용한 측정 정밀도 평가에서 0.5mm와 1.0mm 표준시편의 측정값은 각각 2.48%와 2.28%의 오차범위를 가진 것으로 확인하였다. 실제 공정에서의 PCB제품 측정성능 평가에서도 평균 1.461mm 두께의 제품에 대하여 표준편차 28.99 $\mu$ m, 공정지수  $C_{pk}$ 가 1.2의 값으로 나타나 측정두께의 변화에도 정확하고 안정적인 공정능력을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 개발된 두께자동측정장비는 대량생산제품의 검사공정자동화에 적용함으로써 생산성 증대와 품질향상에 기여할 수 있으며 측정데이터 및 제품검사결과의 신뢰성을 확보하여 안정적인 제조공정관리의 기반을 마련하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 후 기

“이 논문은 중소기업청에서 시행한 산학연 공동기술개발컨소시엄사업의 결과물이며 기술개발에 참여한 거산산업(주) 관계자분들께 감사드립니다.”

## REFERENCES

1. Park. J. B., Lee. E. S., Lee. M. K., Lee.J. G., “Development of a System for Glass Thickness Measurement”, Trans. Korean Society of Mechanical Engineering A, Vol 33. No. 5, pp. 529~535, 2009.
2. Kim. S.J., 2011, “A study on the noncontact on-line measurement of the thickness for roll-to-roll printed patterns”, MS Thesis, Konkuk University, Republic of Korea.
3. May. A.D., Stephan. G., “Stability of polarized modes in a quasi-isotropic laser”, J. Opt. Soc. Am. B. Vol. 6, No. 12. 1989.
4. KS A ISO 5725-2, “Accuracy(trueness and precision) of Measurement methods and results-part2 : Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of standard measurement method”, 2007.
5. J. L. Zapico-Valle, M. García-Diéguez, M.P. González-Martínez, K. Worden, “Experimental validation of a new statistical process control feature for damage detection”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.25, No.7, 2513-2525, 2011.