

LVDT센서를 이용한 접촉식 두께자동측정기 개발

신기열*, 황선*[#]
*영남대학교 기계공학부

Development of Contact-Type Thickness Measurement Machine using LVDT Sensors

Ki-Yeol Shin*, Seon Hwang*[#]

[#]School of Mechanical Engineering, Yeungnam UNIV.

(Received 6 July 2015; received in revised form 23 July 2015; accepted 24 July 2015)

ABSTRACT

In this study, we developed an automated contact-type thickness measurement machine that continuously and precisely measures the thickness of a PCB module product using multi-LVDT sensors. The system contains a measurement part to automatically measure the thickness in real time according to the set conditions with an alignment supply unit and unloading unit to separate OK and NG products. The sensors were calibrated before assembly in the measuring machine, and precision and accuracy performance tests were also performed to reduce uncertainty errors in the measurement machine. In the calibration test, the precision errors of the LVDT sensor were determined to be 1-3 μm as 0.1% at the measuring range. A measurement error of 0.8 mm and 1.0 mm thickness test standards were found to be 1 μm and 4 μm , and the standard deviations of two 1.0 mm products were measured as 14 μm and 8 μm , respectively. In the measurement system analysis, the accuracies of test PCB standards were found to be 2 μm and 3 μm , respectively. From the results of gage repeatability and reproducibility (R & R) crossed, we found that the machine is suitable for the measurement and process control in the mass production line as 7.92% of total gage R & R and in seven distinct categories. The maximum operating speed was limited at 13 pcs/min, showing a value good enough to measure.

Key Words : Thickness Measurement(두께 측정), Contact Type(접촉식), LVDT Sensor(선형가변차동변압기센서), Measurement System Analysis(측정시스템분석), Printed Circuit Board(인쇄회로기판)

1. 서 론

기계, 자동차 및 전자분야 제품의 대량생산공정에서 품질관리는 매우 중요한 요소이며 기존의 공정간 샘플검사에서 전수검사로 전환되면서 생산성과 품질의 향상을 위해 연속생산공정용 자동검사

장비의 수요가 확대되고 있다. 품질관리 항목 중에서 제품의 형상이나 치수를 측정하여 검사하는 데에는 비전(Vision)이나 레이저(Laser)센서를 이용한 비접촉식 측정기술이 널리 사용되고 있다^{1~3)}. 하지만 차광이나 조명의 상태에 따라 측정값의 변동이 심하고 측정대상물의 표면상태에 따라 반사광 등에 의해 측정이 어려운 경우가 발생하는 등의 단점이 있다. 또한 비용적인 측면에서도 마이크로미터(Micrometer), LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 센서 등 접촉식 측정기기에 비해 고

Corresponding Author : seonhwang@ynu.ac.kr
Tel: +82-53-810-3061, Fax: +82-53-810-4627

가이다. 제품의 표면에 직접 접촉측정이 가능한 경우 가격과 정밀도, 사용환경 등에 따라 두께 자동측정용으로 LVDT센서와 같은 접촉식을 선택하는 경우가 많다^[4-6]. 특히 LVDT센서는 제품의 종류와 접촉표면 상태, 접촉부 탐침의 형상에 따라 수 μm 에서 1 μm 미만의 고정도 측정도 가능하며 다수의 센서를 이용하여 여러 개의 측정값을 동시에 처리할 수 있는 장점도 있다.

본 연구에서는 최근 반도체 및 컴퓨터 기술의 눈부신 발전을 통해 그 수요가 증가하고 있는 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)의 양산공정에서 메모리모듈PCB 제품의 단자대 두께를 정밀 측정하고 검사공정을 자동화하고자 한다. 이를 위해 다수의 LVDT센서를 이용한 접촉식 두께자동 측정기를 개발하고 검교정후 측정된 결과는 통계적 공정관리기법으로 분석하여 측정정도를 확인하여 제품과 측정장비에 대한 보다 신뢰성 있는 품질관리 시스템을 제공하고자 한다.

2. 제품규격과 측정센서

본 연구에서 측정할 대상제품은 Fig. 1과 같은 컴퓨터용 메모리모듈PCB 제품이며 컴퓨터 메인보드에 조립할 때 접속부 단자대의 두께가 측정부위가 되며 품질관리의 주요대상이다. 메모리의 용량이 증가하면서 고 다층의 PCB제품을 생산하는 과정에서 적층이나 도금공정에서 불량 발생 수 있으며 단자대의 두께가 제품설계 허용기준을 벗어나게 되면 메모리실장 후 단자대 조립불량 또는 접촉불량으로 사용할 수 없게 되므로 반드시 메모리 실장전에 전수검사를 통해 두께측정을 하도록 관리하고 있다.

두께측정의 대상이 되는 메모리 모듈PCB의 단자대 두께는 1.0 ~ 1.27 mm로 모델에 따라 크기와 모양이 다양하며, 국내의 메모리칩 제조사의 제품설계 기준에서는 단자부의 두께 허용공차를 Fig. 1과 같이 100 μm 이하로 관리하도록 규정하고 있다. 전수검사를 통해 불량품을 구분하고 양품의 두께측정값에 대한 공정분석결과도 제공하는

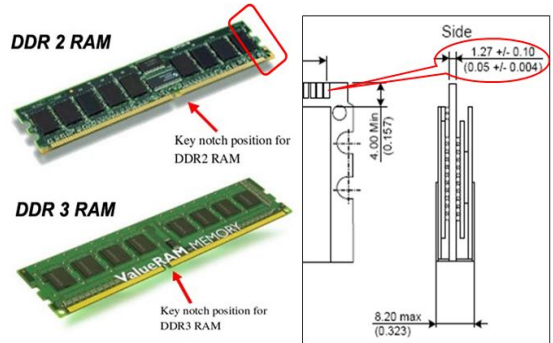


Fig. 1 DDR memory module PCB design specification(DDR2 FBDIMM, HYNIX)

Table 1 Specification of LVDT sensor(DP-S4)

Specification	Value
Measuring Range	± 2.0 mm
Repeatability	0.1 μm
Accuracy (Non-Linearity)	1.0 μm (0.1% at the ± 1.0 mm)
Outside Diameter	8.0 mm
No of Probe	32 ea

것이 필요하다. 특히 제품의 신뢰성을 확보하기 위해서는 두께측정의 정밀도를 허용공차의 10% 단위인 10 μm 의 고정도를 보장하는 것이 바람직하다^[7]. 또한 충분한 생산성을 확보하면서도 안정된 검사를 위해 제품의 자동공급, 측정, 자동분리배출 등의 기능을 포함하는 것이 필요하다.

두께측정에 사용할 센서는 제품측정 규격에 따라 적합한 분해능과 정밀도를 가지는 것을 선택해야 한다. 본 연구에서는 목표 정밀도를 보장하기 위하여 Table 1과 같이 1.0 μm 의 고정도 LVDT센서를 선정하여 사용하였다. 제품의 크기와 종류에 따라 다양한 지점의 측정이 가능하도록 다채널 마이크로미터를 이용하여 총 32개의 센서를 연결하는 측정시스템을 구성하였다.

3. 측정시스템의 설계 및 제작

두께자동측정기는 제품표본의 샘플검사를 위한 수동 장비와는 달리 전공정 자동화를 통해 생산성을 향상하고 전수검사를 통해 출고제품의 신뢰성을 확보하기 위한 것이다. 이를 위해 제품의 자동공급을 위한 정렬 공급부와 제품별로 공정관리기준에 따라 입력된 조건에 따라 실시간으로 자동측정하는 측정부, 측정된 DATA를 통해 양품과 불량량을 판별, 처리하고 평균, 표준편차(Standard Deviation, SD) 등 공정능력을 분석하기 위한 기초통계자료를 연산하고 저장하는 PC제어부와 양품과 불량으로 선별된 제품을 자동분류, 적재하는 배출부로 이루어져 있다. Fig. 2에서는 측정시스템의 설계에 필요한 주요구성품과 각 기능을 설명하였으며 제작을 완료한 두께자동측정기의 주요부사진을 Fig. 3에 나타내었다. 두께측정공정은 일반적인 형상 측정기의 원리와 같이 제품의 종류와 기준두께, 허용공차의 상한과 하한 값을 입력하고 마스터 테이블에서의 측정값을 영점으로 설정하고 제품이 투입되었을 때 측정된 값을 두께로 측정하는 방식이다. 즉, 제품이 하부지그로 투입되었을 때 제품을 고정하고 하부지그를 상승하면 상부지그에 고정된 LVDT센서가 제품의 측정표면에 접촉하면서 제품의 두께를 측정하는 방식이다. 측정된 두께 값이 허용공차의 범위를 벗어나면 불량으로 자동배출하게 된다.

4. 측정시스템의 성능평가

4.1 센서의 검교정

마이크로미터급의 고정도 측정장비의 개발을 위하여 먼저 측정의 핵심요소인 센서의 선형성 검정을 실시하였다. 사용된 검교정용 계측기는 분해능 0.01 μm 인 Mohr 828PC이며 검사 대상 센서는 국내 제조사의 최대 4 mm 길이측정용 LVDT센서로서 선형성(Linearity) 평가를 먼저 수행하였다. Fig. 4는 LVDT센서의 선형성평가 사진이며 Fig. 5와 Fig. 6은 각각 선형성 평가 결과와 오차 데이터(Non-Linearity)를 Full scale에서 표시한 것이다.

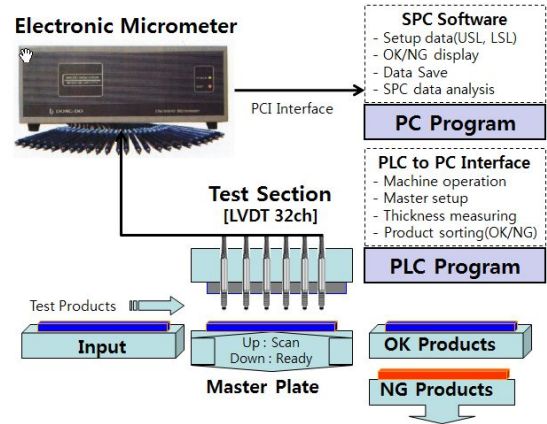


Fig. 2 Concept design of contact type thickness measurement system

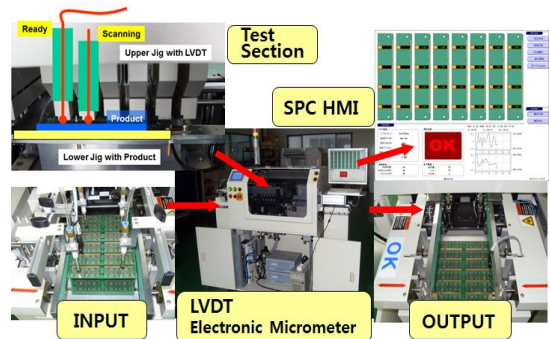


Fig. 3 Main components of contact type thickness measurement system

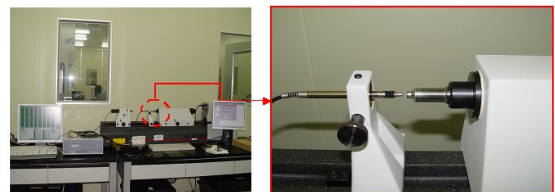
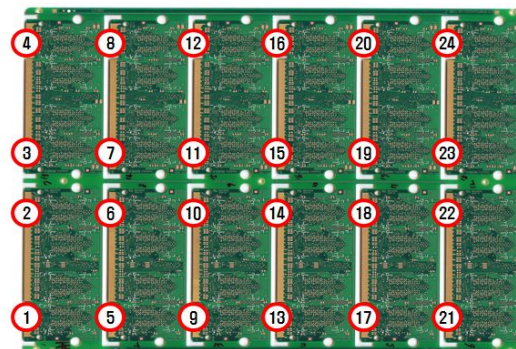
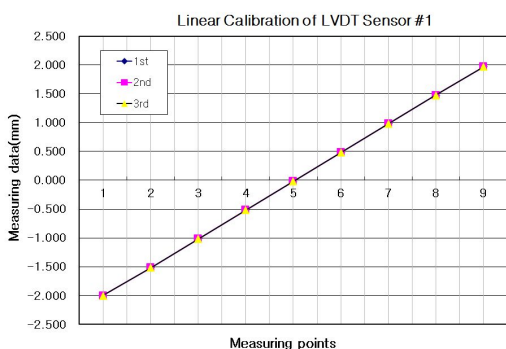


Fig. 4 Calibration test of LVDT sensor

센서의 측정가능 전체 범위에 대하여 0.5 mm 간격으로 5회 반복 측정하여 최대, 최소값을 제외한 3개의 값을 Table 2에 나타내었다. 그 결과 센서의 측정영역 양 끝단에서 오차 범위가 상대적으로

Table 2 Linear calibration data of LVDT sensor

Sensor No.	Unit	Measuring point	Measuring data			Deviation Value		
			1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
# 1	mm	-2.00	-2.000	-2.000	-2.000	0.000	0.000	0.000
		-1.50	-1.514	-1.514	-1.514	0.014	0.014	0.014
		-1.00	-1.016	-1.016	-1.016	0.016	0.016	0.016
		-0.50	-0.517	-0.517	-0.517	0.017	0.017	0.017
		0.00	-0.017	-0.017	-0.017	0.017	0.017	0.017
		0.50	0.482	0.482	0.482	0.018	0.018	0.018
		1.00	0.981	0.981	0.981	0.019	0.019	0.019
		1.50	1.478	1.478	1.478	0.022	0.022	0.022
		2.00	1.968	1.968	1.968	0.032	0.032	0.032



Measuring Points(24P) on the Sample PCB

Fig. 5 LVDT sensor calibration data

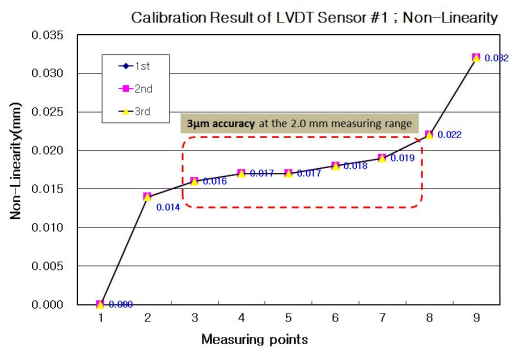


Fig. 6 Non-linearity of sensor at the full scale

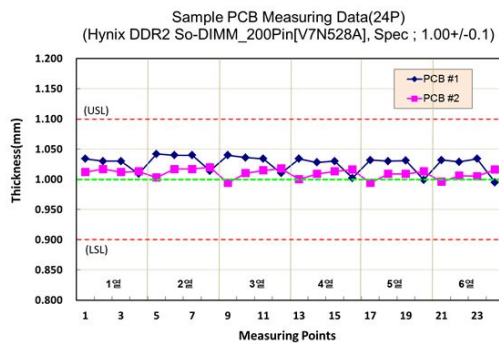


Fig. 7 Thickness measurement result of sample PCB standards with measuring points

크게 나타나는 것을 알 수 있으며 이는 차동변압기의 특성상 말단에서 코일의 자속밀도 변화가 증가하면서 나타난 현상으로 볼 수 있다. 하지만 ± 2.0 mm Full scale에서 양 끝단을 제외한 중앙부(4~6 points)의 최대오차는 제조사가 제시한 범위(0.1% at the ± 1.0 mm)와 유사하게 약 1~3 μm 이내로 나타남을 확인할 수 있다. 이를 통해 두께측정 성능에 필요한 센서의 정도를 확인하고 센서 설치 시 고정도 측정에 유효한 측정영역을 선택하여 사용할 수 있다.

4.2 표준시편 측정

측정시스템의 정확도와 정밀도 등의 성능을 평가하기 위해서는 값을 알고 있는 표준시편의 측정이 필요하다. 본 연구에서는 두께 0.8 mm로 정밀 연마 가공된 철재 표준시편과 설계기준 두께 1.00 ± 0.1 mm인 실제제품(DDR2 So-DIMM_200Pin, HYNIX)을 샘플PCB시편 2개로 선정하여 사용하였다. 표준시편은 사용 전 센서의 검교정장비로 각각의 두께를 측정하여 표준시편의 측정 기준값으로 설정하였다.

표준시편의 기준두께 측정결과에서 철재 표준시편은 0.8 ± 0.001 mm의 균일한 두께로 잘 가공된 것을 확인할 수 있었으며 샘플 PCB시편의 경우 각 제품의 24개 지점의 측정값의 평균이 1번은 1.027 mm, 2번은 1.010 mm으로 나타났으며 표준편차는 각각 14 μm 과 8 μm 으로 나타났다. Fig. 7은 표준시편으로 사용할 샘플 PCB시편의 사진과 측정위치 그리고 각 위치별 두께측정 결과를 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 8에서는 두 개의 샘플 PCB시편에서 측정된 두께 값을 통계분석한 결과로 나타내었다. 실제 제품의 두께측정값은 설계규격의 허용범위에 있으며 메인보드와의 접촉시 밀착도를 높이기 위해 (+) 공차로 제작하고 있는 것은 유효하다고 판단된다. 따라서 PCB시편의 측정 결과에서 나타난 두께측정값의 편차는 PCB 제품의 형상과 측정표면 조건에 따라 나타나는 제품변동값을 포함한 것이므로 실제 개발된 두께자동측정기의 측정결과에도 포함될 수 있는 제품의 고유오차로 볼 수 있다.

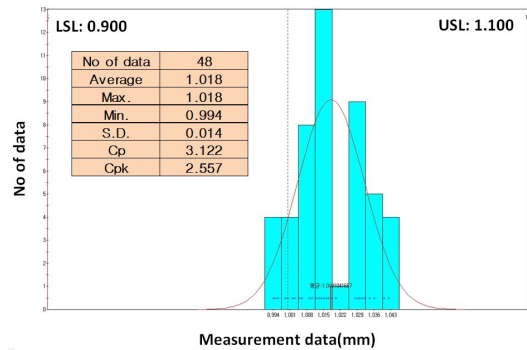
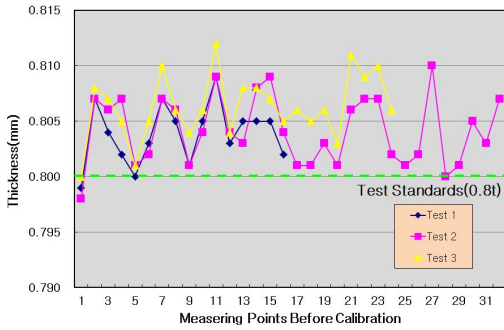


Fig. 8 Statical analysis of sample PCBs thickness measurement data

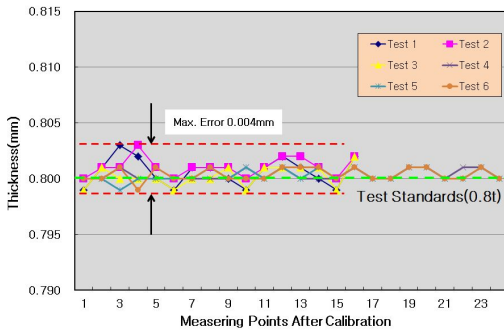
4.3 반복정밀도 평가

KS규격(KS A ISO 5725-1:2012)에서 정밀도(Precision)는 “정해진 조건하에서 반복된 독립적인 측정결과 사이의 일치정도”로 정의되며 반복정밀도(Repeatability)는 “반복조건에 의한 측정결과의 정밀도”로 정의하고 있다^[8].

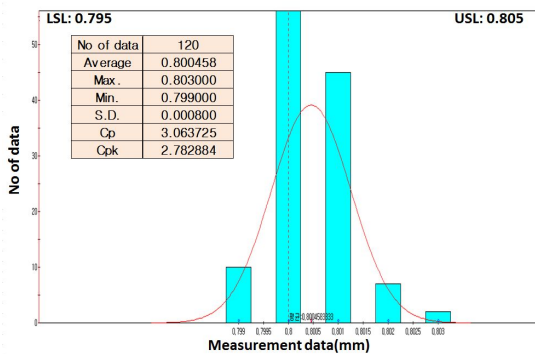
본 연구에서는 치수를 알고 있는 표준시편을 반복측정하여 최대두께와 최소두께의 편차(Deviation)을 두께자동측정기의 반복정밀도로 정의하고자 한다. 평가 절차는 두께가 일정한 표준시편 (0.8 ± 0.001 mm)으로 3회 이상 반복 측정하여 오차에 대한 보정값을 산출하여 장비의 측정연산에 반영한다. 그리고 보정한 장비로 동일한 시편을 반복측정한 결과를 측정값에 대한 반복정밀도(최대편차)로 평가하였다. 동일한 표준시편에 대한 120개의 측정값은 Fig. 9에서는 보정전후의 측정값(a, b)과 보정 후 데이터에 대한 통계분석 결과(c)를 보여주고 있다. 보정 후 표준시편 측정값은 평균 0.800458 mm, 표준편차 약 0.8 μm 을 갖는 정규분포를 가지고 있으며 평균값에 대한 치우침 오차(Bias Error)는 0.458 μm , 최대값 0.803 mm, 최소값 0.799 mm으로 나타나 최대오차 4 μm 의 반복정밀도를 확인할 수 있다. 이 값은 측정 범위 내에서의 센서 정밀도에 근접하는 매우 우수한 측정결과로 볼 수 있으며 동일한 위치에 대한 측정변동값 입을 고려할 때 센서의 측정오차를 포함한 장비의 고유오차 범위로 볼 수 있다.



(a) Measurement data before calibration



(b) Measurement data after calibration



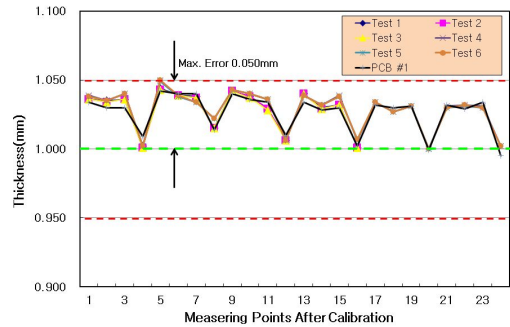
(c) Statical analysis after calibration

Fig. 9 Thickness measurement data of test standards ($t_{av}=0.8$ mm)

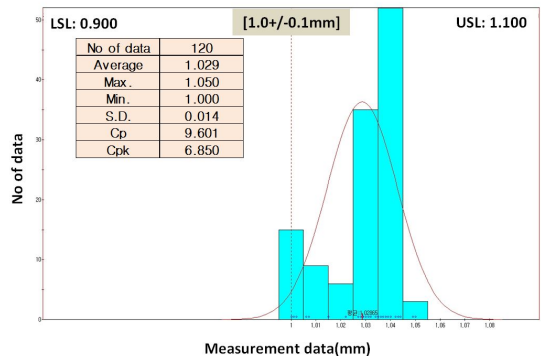
4.3 측정정확도 평가

KS규격(KS A ISO 5725-1:2012)에서 정확도 (Accuracy)는 “개개의 시험결과와 채택된 기준치와의 일치하는 정도”로 정의하고 있으며, 편의(Bias)는 “측정결과의 기대치와 채택된 기준치와의 차”로 정의하고 있다⁹⁾.

두께 0.8 mm 표준시편을 이용한 반복정밀도 평가에서 보정후 측정 평균값에 대한 치우침 오차 (Bias Error)는 0.458 μm 으로 나타나 센서의 정밀도 (1 μm at the 1 mm) 이내에 있음을 이미 확인하였고 반복정밀도는 최대 4 μm 의 오차범위를 가지는 것으로 확인하였다. 다음은 두께가 서로 다른 2개의 샘플 PCB시편을 반복측정하고 그 결과로 분석된 평균값과 편차 등을 통해 두께자동측정기의 PCB제품측정에 대한 정확도를 평가해 보았다.



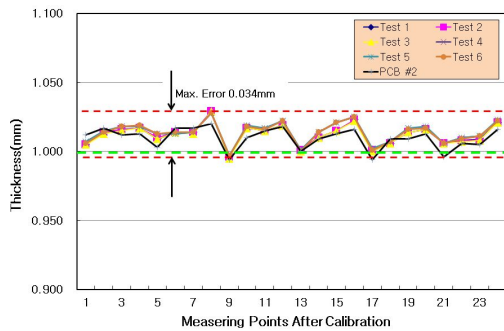
(a) Measurement data



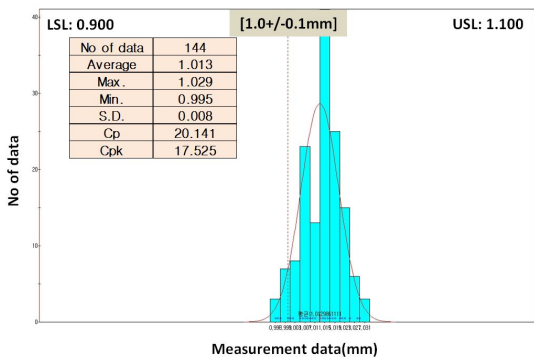
(b) Statical analysis

Fig. 10 Thickness measurement result of sample PCB standards #1 ($t_{av}=1.027$ mm)

Fig. 10과 Fig. 11은 샘플 PCB시편으로 선정한 제품을 반복측정한 결과를 기준에 수동측정한 시편의 각 위치별 두께값과 함께 표시하여 비교해 보았다. 개발장비에서 각 측정지점별로 측정값이 센서 검교정장비로 수동측정한 값의 변동량을 잘 측정하고 있는 것을 확인할 수 있다. 측정값에 대한 통계분석결과에서 1번 PCB시편의 평균 두께는 1.029 mm, 2번은 1.013 mm로 나타났으며 표준편차는 각각 14 μm 과 8 μm 으로 나타났다. PCB시편의 두께 평균값은 수동측정에서 확인된 값과는 각각 2 μm 와 3 μm 의 오차를 각각 가지고 있어 반복정밀도 4 μm 보다 작은 측정기 고유오차 범위 내에 있는 유효한 값이라 볼 수 있다.



(a) Measurement data



(b) Statical analysis

Fig. 11 Thickness measurement result of sample PCP standards #2 (t_{av} =1.010 mm)

4.4 Gage R&R 평가

개발된 측정기를 양산공정에 적용하기 전에 측정시스템의 정밀도와 변동성을 보다 객관적으로 평가할 필요가 있으며 이를 위해 두 가지 샘플 PCB시편을 세 명의 측정자가 각각 3회 반복측정하여 분산분석(ANOVA; Analysis of Variance)용 DATA를 획득하고 Minitab을 이용하여 Gage R&R을 연구해 보았다^[10]. 분산분석 결과에서 대부분의 측정변동값은 제품간의 차이에 의한 것으로 확인되었으며 Total Gage R&R 값은 7.92%로 매우 우수한 상태로 나타나 합부관정에 적합하며 구별범주의 수(Number of distinct categories)도 7로 나타나 양산공정에서 품질관리를 위한 공정관리장비로 사용이 적합하다는 것을 확인할 수 있다.

Gage R&R Study - ANOVA Method

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0000070	3.18
Repeatability	0.0000001	0.04
Reproducibility	0.0000069	3.14
Operator	0.0000018	0.83
Operator*Part	0.0000051	2.31
Part-To-Part	0.0002124	96.82
Total Variation	0.0002193	100.00

Process tolerance = 0.2

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.0026411	0.0158465	17.83	7.92
Repeatability	0.0003043	0.0018257	2.05	0.91
Reproducibility	0.0026235	0.0157410	17.71	7.87
Operator	0.0013466	0.0080798	9.09	4.04
Operator*Part	0.0022515	0.0135091	15.20	6.75
Part-To-Part	0.0145729	0.0874377	98.40	43.72
Total Variation	0.0148103	0.0888620	100.00	44.43

Number of Distinct Categories = 7

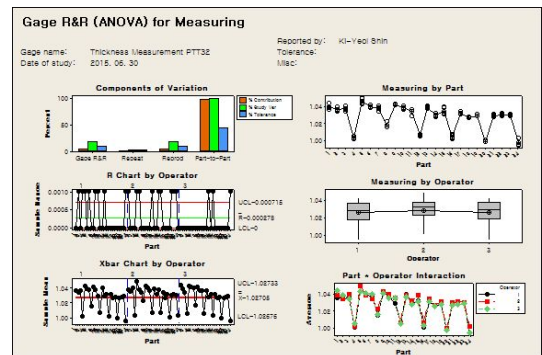
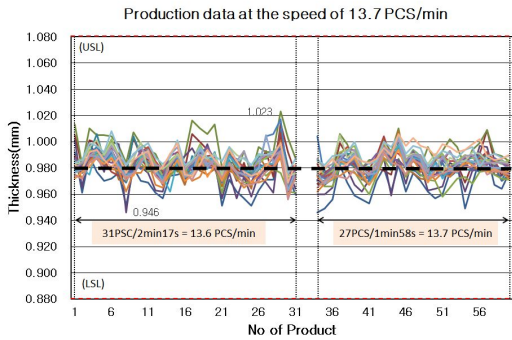
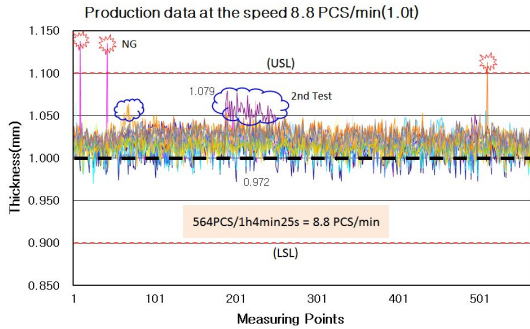


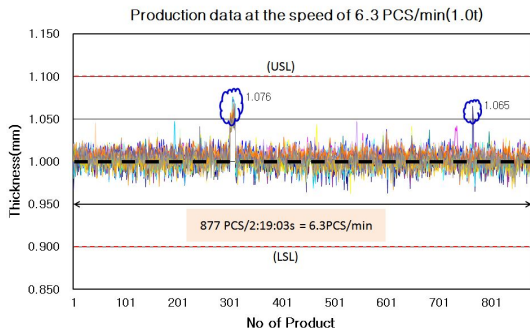
Fig. 12 Result of gage R&R study



(a) Maximum speed test ($t_{av}=0.982$ mm, $SD=9.8$ μm)



(b) Normal speed test ($t_{av}=1.017$ mm, $SD=11.4$ μm)



(c) Lower speed test ($t_{av}=1.004$ mm, $SD=10.2$ μm)

Fig. 13 Measuring data of production according to the operating speed

4.5 양산제품의 측정성능평가

양산공정에서 사용할 두께자동측정기의 성능은 측정정도와 함께 검사공정의 처리속도도 중요한 항목이다. 본 연구에서는 두께자동측정기의 운전 성능을 종합적으로 살펴보고 최적의 운전조건을 제시하기 위하여 처리속도에 따른 검사성능을 함께 평가해 보았다. 고속으로 운전할수록 생산성은 높아지지만 신호처리속도의 한계와 진동 등 외란에 의한 측정정도가 감소할 수 있으므로 제품의 공급배출속도의 한계를 참고하여 최고속도를 분당 13매 (13 pcs/min)로 설계하였다.

Fig. 12는 실제 생산공정에서 공정속도별로 3개의 제품로트에 대한 두께측정결과를 나타낸 것이다. (a)는 평균두께 0.98 mm 제품을 최고속도인 13.7 pcs/min의 운전상태에서 두께를 측정하는 것으로 최대값 1.023 mm, 최소값 0.946 mm, 두께 평균값이 0.982 mm이며 표준편차는 9.8 μm 으로 나타났다. (b)와 (c)의 결과는 샘플 PCB시편과 동일한 사양의 제품으로 운전속도를 변화하면서 두 가지 로트제품에 대한 두께를 자동측정한 값을 나타낸 것이다. 저속 운전조건에서 측정값이 낮은 분산과 편차를 가지면서 보다 정확한 값을 측정하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 최대속도를 포함한 세 가지 운전속도 모두 제품의 두께허용오차를 제품의 고유오차를 포함하여 ± 50 μm 수준에서 검사하는데 충분한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. 제조사나 모델마다 제품두께의 고유오차가 다르므로 두께자동측정기 이를 고려하여 허용오차 범위와 운전속도를 적절히 설정하는 것이 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 메모리 모듈용 PCB제품의 검사 공정에서 사용될 고정도의 접촉식 두께자동측정기를 개발하였다. 측정장비의 개발을 위해 사용된 LVDT센서의 검교정, 측정장비의 설계와 제작 후 반복정밀도와 측정정확도를 확인하고 분산분석과 Gage R&R을 통해 측정시스템의 신뢰성을 분석하였다.

측정에 사용한 LVDT센서의 선형성 검정에서 양 끝단에서 오차가 크게 나타났으나 중앙부 측정 영역에서는 제조사가 제시한 오차범위에 있음을 확인하였다. 반복정밀도와 정확도를 시험에 사용할 철재 표준시편의 평균두께는 0.8 ± 0.001 mm로 측정되었으며 설계규격 1.0 ± 0.1 mm 두께인 샘플 PCB시편 2개의 24개 측정점 평균두께값은 1.027 mm와 1.010 mm이며 표준편차는 각각 $14 \mu\text{m}$ 과 $8 \mu\text{m}$ 으로 나타났다. 표준시편을 이용한 반복정밀도 측정결과에서 보정후 표준편차 $0.8 \mu\text{m}$, 평균값에 대한 치우침 오차 $0.458 \mu\text{m}$, 측정값의 최대오차는 $4 \mu\text{m}$ 이내의 반복정밀도를 가짐을 확인할 수 있었다. PCB시편의 반복측정값에 대한 통계분석결과에서 시편의 평균두께는 1.029 mm와 1.013 mm로 나타났으며 수동측정에서 확인된 값과는 각각 $2 \mu\text{m}$ 와 $3 \mu\text{m}$ 의 측정오차를 각각 가지고 있어 $4 \mu\text{m}$ 의 반복정밀도 범위 내에 있음을 확인하였다. 또한 분산분석에 의한 연구결과에서 대부분의 측정변동 값이 제품간의 차이에 의한 것으로 확인되었으며 Total Gage R&R 값이 7.92%로 매우 우수한 상태로 검사 및 품질관리를 위한 공정장비에 적합하다는 것을 확인하였다. 또한 생산성향상을 위해 운전속도의 한계인 13 pcs/min을 기준으로 속도변화에 따른 측정성능의 차이를 비교하여 나타내었다.

이상의 결과로 개발된 두께자동측정기는 측정 시스템분석을 통해 측정값의 신뢰성을 보장하면서 모든 측정 DATA를 실시간으로 저장 및 통계분석하여 처리함으로써 통계적 품질관리의 표준화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 중소기업청의 기술개발지원을 받아 수행되었으며 연구수행에 참여한 거산산업(주), (재)대구기계부품연구원에 감사를 드립니다.”

REFERENCES

1. Cho, K. C., Kim, S. Y. and Shin, K. Y., "Development of Automated Non-contact Thickness Measurement Machine using a Laser Sensor," J. of KSMPE, Vol. 14, No. 2, pp. 51-58, 2015.
2. Lee, I. S., Kim, H. J. and Ahn, M. S., "Experimental Study on Non-contact Type Inspection System for Wing Rib Thickness Measurement," J. of KSMPE, Vol. 13, No. 6, pp. 104-110, 2014.
3. Ban, K. S. and Bae, J. Y., "A Study on Automated Outer Diameter Measurement System for Axisymmetric Automotive Part," J. of KSMPE, Vol. 12, No. 3, pp. 61-68, 2013.
4. Paulsen, G., Zacny, K., Dreyer, C. B., Szucs, A., Szczesiak, M., Santoro, C., Craft, J., Hedlund, M. and Skok, J., "Robotic Instrument for Grinding Rocks Into Thin Sections (GRITS)," Advances in Space Research, Vol. 51, No. 11, pp. 2181-2193, 2013.
5. Ha, Y. S., "Development of LVDT-Based Measuring System of the Cylinder Liner Wear for Marine Diesel Engines and Its Performance Evaluation," J. of KSME, Vol. 35, No. 6, pp. 829-834, 2011.
6. Kang, H. J., Kweon, M. H., Suh, Y. S. and Ro, Y. S., "Development of a Robotic System for Measuring Hole Displacement Using Contact-Type Displacement Sensors," J. of KSPE, Vol. 25, No. 1, pp. 79-84, 2008.
7. Beckwith, T. G., Marangoni, R. D. and Lienhard V, J. H., Mechanical Measurements, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 45-92, 1993.
8. KS A ISO 5725-1, "Accuracy(trueness and precision) of measurement methods and results—Part 1 : General principles and definitions," 2012.
9. KS A ISO 5725-2, "Accuracy(trueness and precision) of measurement methods and results—Part 2 : Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method," 2012.
10. Bass, I., Six Sigma Statistics with EXCEL and MINITAB, McGraw Hill Professional, pp. 303-328, 2007.