

납땜 검사용 정밀 광학 장치 개발과 응용 Development of Precision Optical System and Its Application

고국원, 조형석*, 김종형**, 김재선**, 김성권**

*한국과학기술원 기계공학과 (Tel :042-869-3253; Fax : 042-869-3210, E-mail : kkw@lca.kaist.ac.kr)

**삼성전자 생산기술본부 (Tel :0331-200-2444, Fax:0331-200-2467)

Abstract : In this paper, we described an approach to design of precision optical system for visual inspection of solder joint defects of SMC(surface mount components) on PCBs(Printed Circuit Board) The illumination system, consisting of three tiered LED lamps and one main camera and four side view camera, is implemented to generated iso-contour on the solder joint according to gradient of the soldered surface. We analyze LED design parameter such as incident angle, diameter of LED ring, and so on to acquire uniform illumination.

Keyword : Solder joint inspection. LED illumination technique. Irradiance analysis, Uniform illumination

1. 서론

최근 들어 전자 기기의 소형 경량화, 고기능화에 따라 전자 부품을 고밀도 회로 기판(printed circuit board, PCB)에 담기 위한 표면 실장 기술의 개발이 다방면으로 진행 중이다. 표면 실장 기술은 PCB표면에 만들어진 전기적 도체 표면에 칩(chip) 형상의 부품 및 평면 IC등의 표면 실장형 부품을 납 접착제(solder paste)를 바른 PCB 위에 탑재 후, 접착 시키는 방법이다. 현재 많은 전자 제품들 내에 이러한 표면 실장 기술에 의해 조립된 PCB가 더욱 많은 비중을 갖고 사용되어지고 있다. 현재 조립된 PCB의 납땜부 검사는 주로 사람의 목시 검사에 의존하는 경우가 많은데, 목시 검사는 PCB 상의 부품의 밀도가 높아 질수록 그 신뢰성 및 전체 생산성 면에서 그 한계에 이르고 있다. 작업자가 이러한 작은 부품의 결함을 검사하는 것은 매우 단순하고 힘든 작업으로 쉽게 피로하고 검사의 신뢰성이 균일하게 보장되지 못하고 있다.

납땜 후의 기판 실장 부품의 상태를 검사 작업의 하나인 납땜부의 검사는 최종 제품의 품질을 좌우하는 매우 중요한 공정 중에 하나이기 때문에 신뢰성 있는 납땜부의 검사를 이루기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다.

그러나, 납땜부가 매우 작고 그 품질의 경계가 모호하여 사람이 검사하기에는 까다롭고 쉽게 피로를 느끼는 작업이며 그 품질을 명확히 구분하여 불량 특징을 파악할 수 있도록 조명 장치의 설계에 많은 어려움이 있다. 또한 납땜부를 검사하는 알고리즘 개발의 관점에서는 납땜부의 형상이 비슷하고 품질의 경계부분이 명확하지 않아서 불량을 성공적으로 검출할 수 있는 기법의 적용이 어려울 뿐 아니라 작업자의 경험을 포함할 수 있는 새로운 검사 방법이 절실히 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 납땜 검사에 가장 핵심이 되는 광학 장치인 개발에 필요한 광분포도 분석 및 광원과 카메라의 배치에 대해서 살펴 본 후, 이러한 기초 실험을 바탕으로 개발된 LED 광학 장치를 이용하여 인쇄 회로 기판부의 납땜부에 생기는 경면 반사에 의해 생기는 등 경사도 곡선의 형태를 분석하여 납땜부의 3차원 형상의 특징을 살펴보고 정량화 하여 이를 토대로 Fuzzy pattern matching 방법을 이용하여 납땜부의 양 불량을 구분할 수 있는 검사 알고리즘을 개발하고 개발된 검사 알고리즘을 다양한 납땜부의 형상에 적용하여 성능을 평가하였다.

2. 납땜 검사용 정밀 광학 장치

납땜 검사를 위한 조명 장치의 기본 요건은 원하는 검사 영역(FOV : Field of Interest)에서 균일한 광 분포도를 갖으며 납땜의 불량 특징을 잘 검출하도록 조명과 광원의 배치를 설계해야 한다. 본 장에서는 경면을 가진 납땜부의 표면을 검사하기 위한 정밀 광학 장치의 설계에 대해서 살펴보도록 하겠다. 먼저 납땜부의 불량 특징을 검출하기 위한 검사 원리에 대해서 살펴 본 후, 조명 장치의 광원의 선택 및 광원의 배치와 광 분포도, 카메라의 배치 등에 대해서 살펴보도록 하겠다.

2.1 검사 원리

검사 대상인 납땜은 대표적인 경면 반사 특성을 가진 물체로서 표면에서 반사된 빛은 같이 입사-반사각의 원리에 의하여 한 방향으로 집중되기 때문에 카메라 방향과 광원의 방향 및 표면의 기울기가 서로 일치하는 기하학적 반사 조건을 만족시키는 제한된 영역만을 검사할 수 있다. 따라서 전체 영역을 검사하기 위해서는 순차적으로 여러 방향에서 점 광원을 조명하여 얻은 이미지를 이용하는 방법을 사용하여야 한다.

본 연구에서는 납땜부의 기울기 측성을 위해서 Ring 형상의 광원을 사용하였다. 그림 1 과 같이 ring 광원을 카메라 축과 동일하게 위치하고 조명하면 같은 Zenith angle 을 갖는 많은 점 광원을 동시에 조명하는 것과 같은 효과를 얻는다. 물체로부터 관원의 거리는 충분히 멀어서 물체에 입사 되는 광은 평행광이라고 가정하고 또한, 카메라 모델은 orthogonal projection 이라고 가정한다. 점 광원의 경우와 같은 이유로 표면 전체를 imaging 하기 위해서 Ring 광원을 카메라와 동축으로 이동하면서 이미지를 얻을 필요가 있다. 이렇게 얻는 이미지는 물체가 곡면을 이루고 있을 경우에 같은 밝기를 가진 점들을 이으면 곡선을 얻을 수 있는데 이 곡선에 해당하는 물체 표면에서의 법선은 같은 Zenith angle 을 갖는다. 같은 물체가 평면일 경우에는 모든 표면이 같은 밝기를 나타낼 것이다. 이렇게 Ring 조명은 같은 법선을 갖는 표면상의 곡선을 알려주어 물체의 3 차원 형상에 대한 정보를 제공한다.

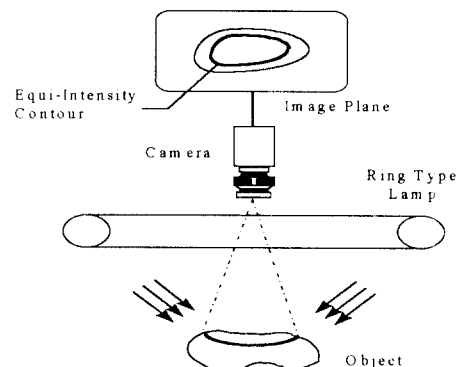


그림 1. Ring 조명하에서 물체에 생긴 highlight 제적
Fig 1. Illumination Principle for solder joint inspection

Ring 형상의 조명하에서 납땜부의 fillet의 형상은 몇 개의 대표적인 법선 vector로 나타낼 수 있고, 불량의 형상에 따라 각기 다른 법선 vector를 구성하고 있다. 납땜부의 fillet 불량의 형상적 차이가 표면 법선 vector의 차이로 대표되며, 이들의 정보를 쉽게 추출하기 위하여 원형 형태의 조명 장치를 사용하였다. 그림 3은 그림 2와 같이 서로 입사각이 다른 3개

의 원형 조명 장치에서 납땜부의 3차원 형상과 2차원 형상을 나타내었다. 그림 2에서 나타나듯이 납땜부의 형상에 따라 다양한 2차원 pattern이 얻어질 수 있다. 이러한 2차원 pattern의 특징으로부터 납땜부의 3차원 형상을 유추하여 납땜부의 양/불량을 검사할 수 있다.

납땜부의 class는 납땜부의 크기에 따라 미납(I), 미납 정상(IA), 정상(A), 정상 과납(EA), 그리고 과납(E)의 5개로 나누었다. 그림 3은 5개의 class의 전형적인 형태와 영상상에 나타나는 색깔의 분포를 보여준다. 미납의 영상은 파란색이 주로 나타나며, 미납 정상에서는 약간의 녹색과 빨간색이 나타나기 시작한다. 정상에서는 lead에서 녹색, 빨간색, 파란색이 순차적으로 나타난다. 과납 정상에서는 주로 빨간색이 많이 나타난다. 과납에서는 파란색의 띠와 빨간색과 녹색 띠로 둘러싸여 있는 형태를 취하고 있다. 이는 마치 볼록한 convex 형태에서 나타나는 pattern과 같다.

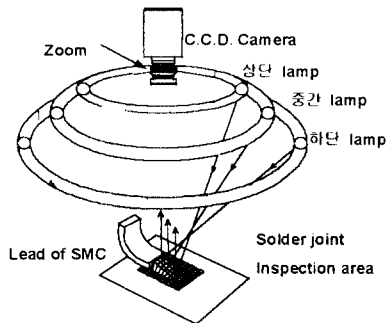


그림 2. 3단 LED 조명 장치
Fig 2. 3-stage LED illumination System

납땜 종류	3차원 형상	3색 칼라 패턴
(1) 미납 Insufficient soldering		
(2) 미납 정상 Insufficient but Acceptable soldering		
(3) 정상 Acceptable soldering		
(4) 과납 Excess soldering		
(5) 과납 정상 Excess but Acceptable soldering		

: Green pattern
 : Blue pattern
 : Red pattern

그림 3. 납땜부와 칼라 패턴
Fig 3. Solder joint shapes and schematic color images

2.2 광원의 선택

지금까지 납땜 검사에 국내에서 주로 사용되고 있는 광원은 3개의 서로 다른 색, 빨강, 녹색, 파랑의 형광등을 사용하였다. 기존의 형광등을 광원으로 사용한 조명 장치는 서로 다른

3개의 색을 사용하므로 한번에 3영상의 정보를 동시에 얻는다는 장점이 있으나, 다음과 같은 문제점이 있다.

첫째, 광원의 밝기를 조절할 수 없으므로 납땜부의 표면 반사 특성에 유연하게 적용할 수가 없다. 납땜부가 오염이되거나 기울기의 분포도가 적은 부분의 형상의 특징치를 영상으로 정확히 획득하기 위해서는 납땜부로 입사 되는 광의 세기를 높일 수가 없다.

둘째, 색의 순도를 맞추기가 어려워 색깔의 정보를 처리하는데 어려움이 있다. 형광등의 경우에는 순수 광원이 아니므로 순수 광원을 얻기 위해서는 경우 순색 필터를 사용하거나 영상 처리 기법을 사용하여 혼색 부분을 제거하는 추가의 노력이 필요하며, 이때는 납땜부의 경사면의 기울기를 정보가 손실될 경우가 있으므로 납땜부의 불량을 정확히 판별하기가 어렵다.

셋째, 유지 보수가 힘들다. 광원의 교체할 경우 같은 파장과 같은 광도의 광원을 얻을 수가 없으므로 조명의 재현성이 부족하므로 이미 검사에 필요한 특징치를 추출하기 위한 영상 처리의 번수들을 다시 조정하여야 하는 어려움이 있다.

넷째, 결품 검사에서는 부품의 몸체의 반사 특성과 색이 달라서 주어진 광도와 한가지 색으로 부품의 인식이 어렵다. TR이나 어두운 색의 부품의 경우 밝기가 고정된 광원으로 인식이 어렵다.

이러한 조명의 유연성 부족을 해결하기 위해서 LED를 광원으로 사용하였다. LED 광원의 특징은 LED 소자에 가하는 전류를 조절하여 밝기 값을 빠르고 자유롭게 조절할 수 있으며 유한의 입사각을 가지고 조명할 수 있으므로 조명의 집중도를 높일 수 있다.

2.3 광분포도 해석

안정된 영상을 얻기 위해서는 검사 영역내의 광분포도가 균일하여야 한다. LED 조명 장치는 기존의 형광 ring 조명 장치와 달리 연속적이지 못하고 각각의 LED가 등 간격으로 배열되어 있으므로, 이를 점등했을 때 평면상에 조명 되는 특정한 형상의 광 입사 분포가 만들어 진다. 이 광 입사 분포는 피 조명 대상 물체의 영상 특징에 큰 영향을 주기 때문에 LED의 배열의 형태와 광원의 거리 및 FOV에 따른 광 분포도를 살펴봐야 한다.

먼저 광원으로 사용된 LED 소자를 살펴보면 표 1에서 나타난 바와 같이 크기가 작으므로 각 LED는 점 광원으로 생각할 수 있다. 표 2.1.은 LED 조명 장치에 사용된 LED 다이오드의 사양을 나타내었다.

표 2.1. LED 사양

크 기	지름 : 5 mm
휘 도	3,000 mm candela
퍼짐각	중심선을 기준으로 좌우 15도

그림 4는 점 광원으로 가정한 LED의 광 방출 분포를 극좌표계에서 보이고 있다. 일반적으로, LED의 광 방출 분포는 LED 광 축을 중심으로 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 보인다.

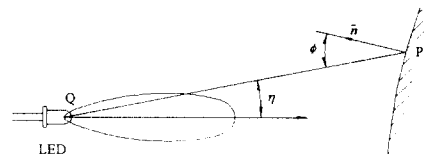


그림 4. 한개의 단위 LED에 의한 입사광
Fig 4. Irradiance of an unit of LED

이 때 가우시안(Gaussian) 분포의 표준편차는 다이오드 접합면에 수직인 방향인 성분 σ_h 와 수직인 성분 σ_v 로 표시되며, 이 두 값이 각 방향의 광선 퍼짐 각의 반이 된다. 본 과제에서 제작된 링 조명에 사용된 LED는 $\sigma_h \approx \sigma_v$ 이므로, 여기에서는 LED의 광선 퍼짐 각이 광 축에 대해 대칭인 것으로 본다. 이 광 방출 분포는 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$I(\eta) = \frac{\Phi}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\eta^2}{\sigma^2}\right] \quad (1)$$

여기에서,

- η : LED 광축과 임의 광선 간의 각도 [radian]
- $I(\eta)$: LED 광축과의 각도가 η 인 광선의 세기[cd]
- Φ : LED 에서 방출되는 광 출력 [W]
- σ : LED 의 광선 퍼짐각 [radian]

그림 3 과 같이 한 개의 LED 가 거리 l 인 임의의 표면을 조명할 때, 표면 위의 임의의 점 P 에 입사하는 광 입사 (irradiance) E 는 다음과 같이 표현된다.

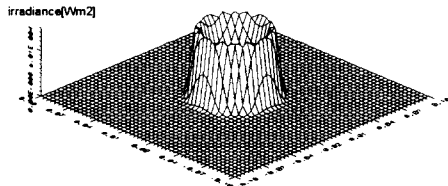
$$E = I(\eta) \frac{\cos(\phi)}{l^2} \quad [W/m^2] \quad (2)$$

여기에서, ϕ 는 광선 PQ 와 법선 벡터 \vec{n} 간의 각도이다.

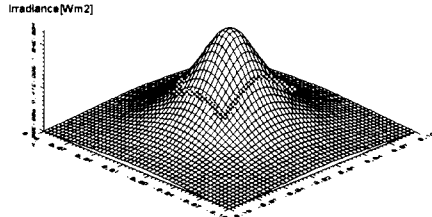
그리고, 개수가 N 인 여러 개의 LED 에 의해, 한 점 (x, y) 에 입사하는 광 입사는 각 LED 에 의한 광 입사를 합하면 된다.

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^N E_i(x, y) \quad [W/m^2] \quad (3)$$

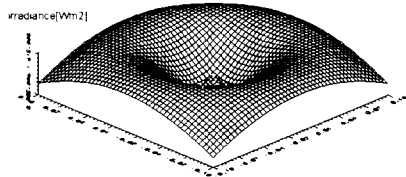
LED 링 조명을 사용하였을 때 PCB 표면에 형성되는 광 입사 분포를 알아보기 위하여 위에서 가정한 조건을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 사용된 링 조명은 모두 48 개의 LED 를 직경 75mm 의 원형으로 배열하여 구성하였다. 그리고 각 LED 의 광 축은 링 조명의 중심 축을 향해 45°의 각도로 기울여 있고, PCB 의 표면에서 150mm 상단에 위치한다. 그 결과 PCB 표면 위에 형성된 광 입사 분포는 그림 5 와 같다.



(a) 기판 위 1cm 위 상단에서 조명할 때 광 분포도



(b) 기판 위 7cm 위 상단에서 조명할 때 광 분포도



(c) 기판 위 15cm 위 상단에서 조명할 때 광 분포도

그림 5. 기판 위에서 조명되는 높이를 달리 할 때의 LED 링 조명 장치의 광 분포도

그림 6 는 시뮬레이션에서 제시한 조명 장치의 설계 사항으로 제작된 LED 조명을 사용하여 15cm 수직으로 위치시킨 뒤 미리 설정된 검사 영역 10x10mm 에서 카메라를 이용하여 획득한 영상상의 gray level 분포도를 보여 주고 있다.

그림 6 에서 와 같이 실제 LED 광원을 사용한 결과에도 검사하고자 하는 영역에서의 광 분포도는 균일함을 알 수 있다.

LED 원형 조명에서의 광 분포도는 검사하고자 하는 영역과

LED 조명 장치의 입사각과 LED 조명 장치와 검사 평면과의 거리 등의 기하학적 구속 조건에 의해서 결정이 되며 그림 7 과 같이 설명 될 수 있다. 원하는 검사 영역의 크기 d 에 입사각 θ 로 조명을 할 때, LED 소자의 퍼짐각을 σ , 링 조명과 검사 평면의 거리를 Z 할 때, 광 분포도가 균일해 질 수 있는 링 조명의 직경은 D 은 아래 그림 7 에서 기하학적 구속 조건에 의해 구할 수 있다.

$$D \geq 2 \cdot Z / \tan(\theta + \sigma) \cdot d \quad (4)$$

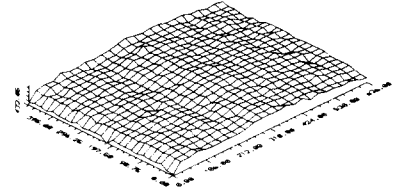


그림 6 실제 영상으로 획득한 원형 LED 조명의 광 분포도

한 개의 LED 소자는 퍼짐각 σ 를 가지고 입사각 θ 로 검사 평면에 빛을 조사한다. 이때 각 LED 소자에서 발생된 광이 검사 영역 내에 모두 입사하게 되면 검사 영역의 중앙부에서는 입사된 광이 모두 합해지므로 그림 5(b) 처럼 중앙부에 강한 분포도를 가지게 된다. 그러므로, 검사 영역 안에서 고른 광 분포도를 가지기 위해서는 각 LED 에서 비추는 광이 검사 영역 밖에서 조명 되게끔 LED 소자의 위치를 설정해야 한다.

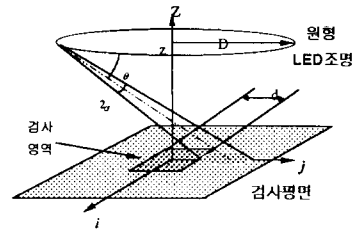


그림 7. 균일한 광 분포도를 갖기 위한 기하학적 조건
Fig.7 Geometric condition for uniform irradiance

2.4 납땜 검사용 정밀 광학 장치 설계

2.4.1 조명 장치 설계

본 연구에서 납땜부의 검사를 위해 개발된 납땜 검사용 정밀 광학 장치는 서로 다른 지름, 높이를 가진 3 개의 단위 링 형태의 조명 장치와 원형 조명과 동축으로 구성되어 있는 줌 (Zoom) 기능을 가진 카메라와 4 개의 기울어진 측면 검사 카메라, LED 의 밝기를 조정해 주는 controller 와 4 개의 카메라를 선택적으로 선택할 수 있는 Mux 로 구성되어 있다. 그림 8 은 정밀 광학 장치의 시스템의 사진을 보여준다.

원형 LED 조명 장치의 3 단으로 구성되어 있으며, 각 단의 광원은 256 단계로 조절되며 독립적으로 작동되어 다양한 조명 조건을 제공할 수 있게 되어 있다. 상단의 LED 배열은 지름이 73mm, 중간은 139mm, 그리고, 하단은 169 mm 로 구성되어 있다. 검사 대상인 인쇄 회로 기판에서 조명 되는 각도는 중앙에 위치한 Zoom 카메라를 기준으로 상단은 70 도, 중간은 50 도, 그리고 하단은 25 도 이다. J-lead 검사용으로 설계된 카메라는 링 조명과 동축으로 25 도 기울어져 있다. 중앙 카메라에서는 상단 조명은 편평한 면에서 반사된 빛만을 카메라로 입사 되어 인식이 가능하게 되며, 중간 조명은 약간 기울어진 면을, 그리고 하단의 조명은 급한 경사면을 갖는 면을 인식하게 된다.

LED 를 통해 나온 빛은 산란 장치인 확산판(diffuser)을 통해 산란되어 납땜부에 조명 된다. 이러한 확산판의 사용은 원형 LED 광원은 기존의 Ring 조명 장치는 달리 몇 개의 단위 점 광원을 배열해 놓은 것이므로 광원이 연속적이지 않으므로, 광원의 연속성을 보완하기 위해서 이다. 표 2 는 앞 절의 광 분

포도 시뮬레이션 결과인 식(4)를 이용하여 설계된 조명 장치가 균일한 광 분포도를 얻을 수 있는 지를 나타낸 결과이다. 주어진 LED 조명과 기관의 거리(Z)와 입사각(θ), 퍼짐각($\sigma=10$ 도) 및 검사영역(10mm)에 대하여 식(4)를 만족하므로 모두 균일한 광 분포도를 얻을 수 있음을 알 수 있다

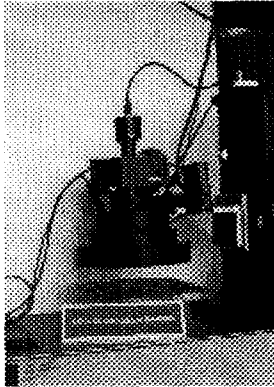


그림 8. 납땜 검사용 정밀 광학 장치
Fig. 8 Image of precision optic system for solder joint inspection

표 4 균일한 광 분포도를 얻기 위한 최소의 지름

	입사각 (θ)	거리 (Z)	최소 지름 (D)	설계 지름 (D)
상단	70도	100mm	25.26mm	73mm
중간	50도	70mm	70.82mm	139mm
하단	25도	40mm	104.25mm	169mm

본 연구에서 설계한 조명 장치는 검사 기관과 조명 장치의 상대 거리가 충분히 멀고 FOV(field of view)가 충분히 작을 경우 단위 점 광원으로 인한 광원의 불연속인 부분이 나타나지 않음을 알 수 있다.

3. 납땜부의 영상

그림 7은 LED 조명을 사용하여 획득한 인쇄 회로 기관의 영상을 보여 주고 있다. 경면 반사의 특성을 갖는 표면들, 즉 lead부, 납땜 부등은 경사도에 따라 각기 다른 색깔을 선명히 보여 주지만, 플라스틱 package나 인쇄 회로 기관의 바닥면 등 난반사 특성을 가지고 있는 부분은 원래 재질은 고유 색깔을 보여 준다. 카메라 렌즈의 초점이 납땜부에 맞추어져 있기 때문에 높이가 다른 부분은 보다 흐리게 보인다.

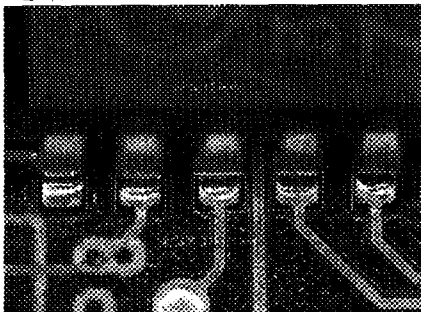


그림 7. LED 원형 조명 시스템에서 PCB의 영상
Fig 7. Image of PCB inspected under the proposed illumination system

그림 8은 본 조명장치를 사용하여 획득한 납땜부의 영상이다. 납땜의 경사면에 따라 LED 조명에 의해서 생기는 등 경사도 패턴이 선명하게 나타남을 알 수 있다.

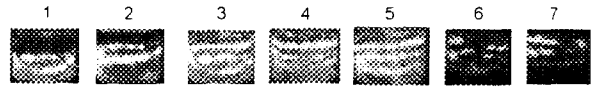


그림 8. 납땜부의 영상
Fig. 8 Image of solder joints

4. 결론

본 연구에서는 인쇄회로 기관의 납땜부의 검사를 위한 핵심 기술인 조명 장치 설계에 관하여 살펴보고 그 결과로 주어진 검사 영역 내에 균일한 광 분포도를 가짐을 보였다. 또한 기존의 광원으로 칼라 형광등을 LED 광원으로 교체하였다. 이는 기관의 특성과 부품의 특성에 따라 광원의 조절 가능하여 밝은 납땜부의 패턴을 얻을 수 있고, 광원이 점 광원에 가까우므로 선명한 선명한 납땜부의 등경사도 띠를 얻을 수 있었다.

납땜부의 검사 작업은 자동화에 있어서 영상 인식 문제 이외에도 납땜부의 형상이나 그 불량 형태가 다양하여, 이를 잘 분리할 수 있는 분류기의 개발이 필요하므로 이에 관한 연구가 진행중이다.

5. 감사의 글

본 연구는 국채과제인 "검사및 조정기술"의 지원으로 이루어 졌습니다. 관계자 분들에게 감사의 뜻을 전합니다.

6. 참고 문헌

1. Bartlett P.J., Best C.L., Cole R., Jain, D., Mukherjee and Skifstad K.D., "Automated solder joint inspection", IEEE trans. PAMI, Vol 10, No 1 (1988) pp31-43.
2. Capson and Eng S. L., "A tiered color illumination approach for machine inspection of solder joint", IEEE Trans. PAMI, Vol 10, No 3(1988) pp 387-393.
3. Takagi, S. and Hata W.B., " Visual inspection machine for solder joints using tiered illumination, Pro. SPIE, Vol 1386 (1990) pp 21-29.
4. Park, J-S and Tou J. T., "A solder joint inspection system for automated printed circuit board manufacturing", Pro. IEEC Conf. Robotics and Automation, Vol 2(1990) pp 1290-1295.
5. J.H. Kim and H.S.Cho, "Neural network-based inspection of solder joints using a circular illumination", Image and Vision Computing, 1995(to be appeared).
6. H.J. Zimmermann. " Fuzzy Set Theory and Its applications", Kluwer-Nijhoff Publishing. pp 205-212.
7. Nayer A.C., Sanderson L.E., Weiss and Simon D.D., "Specular surface inspection using structured highlight and Gaussian images", IEEE Trans. Robotics Automation, Vol 6, No 2(1990), pp108-218.
8. J. H. Kim and H. S. Cho, Neural Network-based Inspection of Solder Joints using a Circular Illumination", Image and Vision computing, Vol. 13, pp. 479-490. 1995.
9. Park J.S. and Tou J. T., "A Solder Joint Inspection system for automated printed circuit board manufacturing". Proceeding of Int. Conf. on Robotics and automation, pp. 1290-1295, 1990
10. H.S.Cho, K.W. Ko, I.S. Joung, "Development of Advanced Solder Joint Inspection System for SMC", KAIST LCA Tech. Report 1996.