

논문 2010-471E-1-2

# 다파장 IR-heater를 이용한 재작업 장치 설계

## (Design of Rework Device using Multi-wave IR-heater)

조도현\*

(Do-Hyeoun Cho)

## 요약

본 논문은 다파장 IR-heater를 이용하여 전자부품을 솔더링 하거나 또는 회로기판으로부터 분리를 하는 전자회로기판 수리 장치에 관한 설계를 다룬다. 이 IR 수리 장치는 IR-heater를 이용하여 납땜의 용융온도 설정에 따라 안정한 온도 제어 아래 목표 영역의 온도를 증가시킨다. 이렇게 설계된 시스템은 PCB와 실장된 소자에 어떠한 열 손상을 주지 않는다. 그 성능을 실험을 통해 평가한다.

## Abstract

This research is the result for studying about the IR Rework station which is using a multi-wave IR-heater for soldering and de-soldering on the substrate such as PCB. This IR repair and reflow system is increasing the temperature on the target area under stable temperature control following setting point melting point of solder and lead free solder using IR-heater. So this system is not giving any thermal damage on the target PCB and components even closed components. The soldering and de-soldering quality is evaluated through the actual test.

**Keywords :** IR-heater, PCB, Rework, BGA, Void

## I. 서론

최근 휴대전화로 대표되는 모바일 전자기기 산업의 발전에 따라 PCB를 사용한 전자회로 제작에 첨단 초소형 부품, BGA, CSP 부품의 장착 확산되고 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 첨단 부품들을 사용하여 제품을 개발하거나 생산하는 과정에서 솔더링 불량(soldering error)이 발생하거나 오류가 있는 부품을 교체하는 작업을 위하여 PCB에서 부품을 떼어내고, 다시 부착하는 일련의 과정이 필요하다.<sup>[2~5]</sup>

재작업(rework or repair)은 PCB에서 안정적으로 부품을 탈부착(desoldering/soldering)하는 관한 일련의 과정을 의미 한다. 과거에는 이러한 재작업 과정이 온도

조절이 필요 없는 단순한 열풍(hot-air)으로도 충분히 가능했지만 고가의 보드 및 부품이 사용되는 전자회로 기판에는 적합하지 않다. 열풍기는 쉽게 사용 가능한 방법이지만, 사용시간에 따라 온도가 상승하는 단점을 가지고 있어서 PCB를 태우거나 부품에 손상을 가져오게 된다.<sup>[6]</sup>

그러므로 고가의 보드 및 부품이 사용되는 PCB 회로에는 부품에 따라 적절히 온도가 제어되고 원하는 부분에 정확하게 열을 가해 제거하거나 솔더링하는 재작업 기술이 필요하다. 이러한 재작업 기술은 1990년대 말 휴대전화의 급증과 더불어 개발이 확산되어 왔다.<sup>[7]</sup>

재작업 기술은 가열원의 방법에 따라 크게 열풍(hot air) 방식과 적외선 히터(IR, infrared heater) 방식으로 구분된다. 열풍방식은 내부에 뜨거운 바람을 컴프레서를 통해 제어하여 재작업 과정에 사용하는 기법이고, IR 방식은 IR 히터소스를 사용하여 열을 전달하는 방식이다.

그 동안 재작업은 열풍방식이 주류를 이루고 있었으

\* 정회원, 인하공업대학 디지털전자과  
(Dept. of Digital Electronics, Inha Tech. Col.)

※ 이 논문은 2009년도 인하공업대학 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

접수일자: 2009년8월25일, 수정완료일: 2010년3월10일

나 특수 부품의 재작업에는 전용 노즐이 있어야 하는 등 매우 정밀한 열관리 제어가 필요하다. 동일한 부분에 재작업이 반복될 경우 부품과 PCB보드에 손상을 주게 된다.<sup>[8-9]</sup>

한편 IR heater 방식은 열전달 속도가 빠르고, 집중적으로 특정 부품에만 열을 가해 인접하는 부품에 피해를 주지 않고, 특수 재질의 부품 및 PCB에서도 재작업이 가능한 장점을 가지고 있다. IR 방식은 부품의 경박 단소화와 협피치 등의 복잡한 기판에서 월등한 성능을 보인다. IR 재작업의 큰 장점은 재작업으로 탈착한 부품을 다시 재사용할 수 있다. 여러 번의 탈부착에도 부품이나 PCB기판에 전혀 손상을 입히지 않는다.

그러나 기존의 IR 방식은 단파장의 IR 방식으로 효율이 떨어진다. 이러한 단파장의 문제를 해결하는 다파장의 IR은 보드 및 부품의 재질에 따라 흡수 및 투과되기 때문에 정밀한 솔더링이 가능하다.<sup>[10]</sup>

단파장 IR과 달리 다파장 IR은 BGA(Ball Grid Array)를 투과해 솔더 볼에 직접 열을 가하기도 하고, 보드에 반사해 볼에 열을 가한다. 즉, 위와 아래에서 직접 열이 전달되어 솔더 볼이 재응착 되어 보이드(void) 없이 솔더링 된다. 보이드 제로(void zero)를 위해 생산 현장에서는 여러 가지 시도를 하고 있는데, IR Heater를 이용하면 손쉽게 해결할 수 있다.

본 논문에서는 다파장 IR-heater를 사용하여 전자부품을 선택적으로, 대상 전자부품을 균일하게 가열하여 열응력을 가급적 억제하면서, 효율적으로 납땜하거나 또는 회로기판으로부터 분리할 수 있는 전자부품의 납땜, 분리장치를 제공하는 방법을 제안한다. 그리고 그 성능을 실험을 통해 평가한다.

## II. 본 론

### 1. 열풍(hot air)을 이용한 재작업 방법

솔더링 장치는 PCB(인쇄회로기판)상에 IC를 장착할 경우 열풍분사장치의 선단에 형성된 진공비트에 IC를 흡착시키고, 크립 납땜이 도포된 인쇄회로기판상의 해당하는 도전 패턴 상에 강하시켜 올려놓은 후 일정 온도로 제어된 열풍을 노즐을 통해 분사하여 가열하도록 구성되어 있다.<sup>[11-12]</sup>

PCB에 납땜되어 있는 IC의 분리는 노즐을 기판상의 IC에 접촉 시켜 가열하고, 노즐 내의 진공비트에 흡착하여 기판으로부터 분리하는 방법으로 이루어지고 있

다. 그러나 열풍을 가열수단으로 삼은 경우, CSP(chip size package), 마이크로 BGA와 같은 미세전자부품에서는 그 표면을 균일하게 가열하는 것이 불가능하여 표면 온도에 편차가 발생하고, 이로 인하여 가열시의 열팽창 차이에 의해 장치 내부의 본딩영역이 잘 파손된다는 문제가 있다.

또한, 열전도율, 비열 모두 현저하게 낮은 공기를 열전달매체에 사용하기 때문에 단위시간에 대량의 가열공기를 공급할 필요가 있으며, 가열 시에 발생하는 땀납으로 인한 오염물의 회수가 곤란하다.

열풍공급노즐로부터 누설되는 열풍이 분리, 납땜 대상 부품에 인접하는 전자부품을 파손할 우려가 있으며, 만약 이들 열풍을 완전히 차폐하여 상부측으로 배기하고자 하여 배기 덕트를 마련하면, 전자부품 사이에 현저하게 큰 간격이 필요하게 되어 적용할 수 없는 인쇄회로기판도 발생한다.

이와 같은 열풍을 가열매체로 하는 장치의 문제를 해소하기 위해, 적외선을 열원으로 한 장치를 사용하는 것도 고려될 수 있는데, 이들 장치는 납땜영역(lead부)이 부품의 주변에 마련된 전자부품을 대상으로 하는 것이므로, 본체의 이면을 납땜영역으로 하는 CSP, 마이크로 BGA와 같은 전자부품에 적용할 수 있다고는 말할 수 없다.<sup>[13]</sup>

### 2. 다파장 IR heater를 이용한 재작업 방법

열풍방식의 문제를 해결하기 위하여, 적외선히터로 전자부품을 선택적으로, 대상 전자부품을 균일하게 가열하여 열응력을 가급적 억제하면서, 납땜하거나 또는 회로기판으로부터 분리할 수 있는 전자부품의 납땜, 분리장치를 제공하는 방법이 도입되었다.

#### 2.1 다파장 IR-heater를 사용한 재작업 장치의 구조

본 논문은 이와 같은 과제를 달성하기 위하여 그림 1과 같은 장치를 구현 하였다.

이 장치는 진공비트(vacuum bit)에 의해 전자부품(device)을 흡입하는 진공비트에 의한 과정과, 재작업을 위한 회로기판 윗부분의 전자부품의 온도를 온도검출수단에 의해 검출하고 진공비트의 외곽부에 적외선을 조사하여 열을 가한다. 적외선 조사(IR lighting)를 제한하는 방법을 통해 전자부품 및 PCB에 조사되는 적외선을 제한하여 전자부품 주위의 PCB를 가열하면서 전자부품

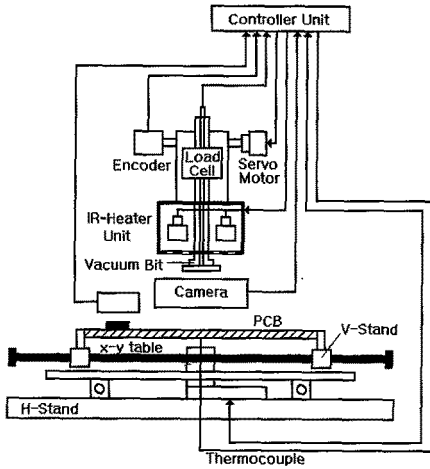


그림 1. 제안된 적외선히터 제작업 시스템  
 Fig. 1. Proposed IR-heater Rework System.

의 솔더링 영역을 뿔납의 용융온도까지 가열하여 전자 부품 탈부착하는 방식이다.

세부적인 구조는 전자부품의 납땜과 분리를 위한 장치로 각각 수평과 수직의 작업지지대(H and V work holder)를 설치하여, 수평 작업지지대에는 PCB의 평면 위치를 설정하는 X-Y 테이블이 있고, 테이블의 위부에는 슬라이드 커버가 장착하였다. 수직 작업지지대에는 적외선조사장치와 비상정지를 위한 스위치를 설치하였다.

그리고 가열수단, 즉, 적외선조사장치(IR lighting unit)는 수직과 수평 작업지지대에서 각각 상하 방향과 상측으로 승강되도록 설치되어 있다. 인코더(encoder)에 접속된 서보모터(servo motor)로 구성되고, 적외선조사 장치는 서보모터에 연결되어, 수직지지대의 가이드수단을 따라 상하 방향으로 이동되므로, 적외선조사장치에 의한 가열수단과 진공비트가 수평지지대의 상측에서 승강된다.

그림 1의 설치 카메라를 통하여 PCB면과 부품 패드(pad) 면을 보면서 솔더링을 통해 PCB에 부품을 장착하게 된다.

2.2 다파장 IR-heater의 세부구조

그림 1의 IR-heater 부분을 자세히 살펴보면 그림 2와 같다. X-Y 테이블의 이면과 수평지지대와의 사이에는 회로기판 이면의 진공비트와 대향하는 위치에, 회로기판의 이면을 가열하는 적외선조사장치가 배치되어 있다.

적외선조사장치는 하단에 부압(negative pressure)에

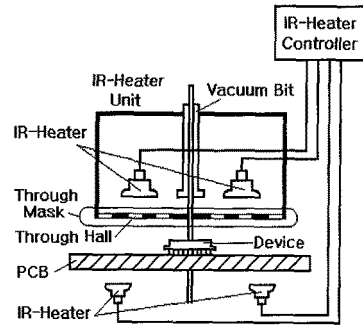


그림 2. 적외선 가열 장치  
 Fig. 2. Infra-red heating unit.

의해 반도체장치와 같은 전자부품을 흡착하는 진공비트가 탈부착 가능하게 장착되며, 진공비트의 선단 영역에 적외선을 조사하는 적외선발생수단과, 진공비트에 부압을 공급하는 진공파이프와, 진공파이프의 상부를 지지하며, 진공비트에 작용하는 압력을 검출하는 로드셀(load cell)과 온도검출수단이 설치되어 있다. 온도검출수단은 열전대(thermocouple)로 구성 하였다. 온도검출점은 내열 열전도성접착제, 예를 들면 실리콘 그리스를 통해 전자부품에 접촉시킴으로써, 피 가열 전자부품의 온도를 정확하게 검출할 수 있게 하였다.

또한 그림 2처럼 납땜/분리의 대상이 되는 전자부품의 활영면과 거의 등등한 사이즈로 투과구멍(through hall)을 설치하여 적외선이 선택적으로 통과하도록 마스크를 설치하였다. 이들 관통홀은 납땜/분리의 대상이 되는 전자부품 주위의 회로기판을 보조적으로 가열하기 위해 적외선을 조사하기 위한 조사구멍으로서, 대상 외의 전자부품을 불필요하게 가열하지 않도록 하며, 대상이 되는 전자부품으로부터 열발산을 가급적 억제할 수 있도록 되어 있다.

PCB의 밑면에 설치된 IR heater로 작업하고자 하는 PCB 전체에 열을 가하게 되고, PCB의 윗면에 설치된 IR heater를 통해 작업하고자 하는 특정 부위에 열을 가해 주는 방식을 사용한다. 이렇게 함으로써 다층기판(multi-layer PCB)에서 특정부위에 열이 과도하게 가해져서 팽창되어 휘거나 부풀어 오르는 현상(warpage)을 제거할 수 있다.

3. 제작업 알고리즘

제안하는 전자부품 납땜, 분리방법에 대해 설명한다.

그림 3(a)은 전자부품을 회로기판에 납땜하는 방법을 보여주는 작업순서이다. 납땜할 전자부품에 적합한 가

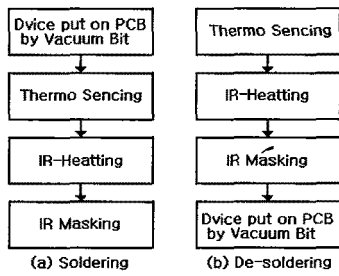


그림 3. 장착/제거 처리 흐름도  
Fig. 3. Soldering/desoldering process flow chart.

열 프로필을 설정하거나, 미리 등록되어 있는 가열 프로필의 데이터를 불러낸다. 납땜할 전자부품이 지정된 위치로 반송되어 오면, 레이저 거리측정장치에 의해 전자부품의 표면과의 거리를 측정하여 전자부품의 두께를 검출한다.

전자부품을 진공비트의 바로 밑으로 반송하여 진공비트에 지지시킨다. 이 상태에서는 그림 2에 나타낸 것처럼 전자부품의 표면에 열전대의 열접점이 접촉하여 전자부품의 표면온도가 신호로서 제어장치에 입력된다.

센터링장치에 이동시켜 진공비트와 전자부품과의 상대위치를 규제하고, X-Y 테이블을 이동시켜 회로기판의 소정의 도전패턴을 진공비트의 바로 밑으로 이동시킨다. 필요에 따라 전자부품의 저면과 회로기판의 도전패턴과의 화상을 하프 미러에 의해 합성시켜, X-Y 테이블의 위치를 미세조정 한다.

위치조정이 종료된 과정에서, 커버를 닫고 버튼을 누르면, 서보모터가 고속 작동하여 적외선조사장치가 하강하며, 그 높이가 인코더에 의해 검출된다. 설정된 위치까지 하강한 과정에서, 서보모터가 저속 회전하여 더 계속해서 강하한다. 전자부품의 저면이 회로기판과 접촉하면, 진공파이프에 반력이 작용하여 로드셀로부터 하중신호가 출력된다. 하중이 소정의 값, 예를 들면 0.1g에 도달한 시점에서, 서보모터가 정지된다. 이로 인해, 전자부품이 회로기판에 납땜에 적합한 압력으로 위치 결정된다.

다음 가열 명령이 내리면, 전자부품의 표면에 접촉하고 있는 열접점에 의해 검출되는 온도의 시간적 변화가, 미리 설정된 상태가 되도록 적외선원으로부터의 공급전력이 제어된다. 적외선원으로부터의 적외선은 적외선조사제한수단의 조사창을 통과하여 전자부품을 위에서 가열하고, 동시에 관통홀을 투과한 적외선이 전자부품 장착영역 주위의 회로기판을 가열한다. 이에 따라, 적외선으로 가열된 전자부품으로부터 회로기판으로 열

전도를 가급적 억제하면서 전자부품 이면의 납땜을 용융온도까지 급속하게 가열할 수 있다.

이러한 가열에 수반되어 전자부품과 회로기판이 열팽창하여 진공비트의 반력(압력)이 상승하면 진공파이프를 통해 로드셀의 하중도 증가하므로, 서보모터가 역회전하여 전자부품의 가압력을 일정하게 유지하게 된다.

그러면, 전자부품이 회로기판에 항상 일정 압력으로 가압되기 때문에, 전자부품의 파손이나, 납땜 깨짐에 의한 단락을 방지할 수 있다. 이렇게 하여 회로기판(P)에도포된 납땜 크립, 또는 전자부품의 납땜 입자가 용융된 시점에서 적외선원으로부터의 전력 공급을 정지하며, 납땜이 고화된 시점에서 서보모터를 역전시키고 적외선조사장치를 상승시켜 원래의 위치로 복귀시킨다. 솔더링 때에 필요에 따라 하부 히터에 의해 회로기판의 이면 온도를 관리하면서 보조 가열함으로써, 전자부품의 과열을 방지하여 확실하게 납땜을 할 수 있다.

그림 3(b)은 회로기판에 기 납땜된 전자부품을 분리하는 방법을 보여주는 작업흐름도이다. 회로기판에 납땜되어 있는 전자부품을 교환을 위해 분리할 경우에는, 전자부품이 납땜되어 있는 회로기판을 X-Y 테이블에 의해 장치의 수평지지대에 수평하게 공급하여 위치 조정한다. 위치조정이 종료된 과정에서 적외선조사장치를 강하시켜 진공비트를 전자부품에 소정 하중으로 접촉시킨다. 전자부품의 온도가 규정 시간 패턴으로 상승하도록 적외선원으로부터의 공급전력을 제어하여, 전자부품을 고정하고 있는 납땜을 용융시킨다. 서보모터를 역전구동하면, 전자부품이 진공비트에 의해 파지되어 회로기판으로부터 떨어지게 된다.

이러한 분리의 경우에도 상술한 바와 같이 적외선원으로부터의 적외선은 적외선조사제한수단의 조사창을 통과하여 전자부품을 상면으로부터 가열하고, 동시에 관통홀을 투과한 적외선이 전자부품 장착영역 주위의 회로기판을 가열한다. 이로써, 적외선으로 가열된 전자부품으로부터 회로기판으로의 열전도를 가급적 억제하면서 전자부품의 이면의 납땜을 용융온도까지 급속하게 가열할 수 있다. 로드셀로부터 마이너스의 하중신호가 출력된 경우에는, 미용용 납땜이 존재하는 것을 의미하기 때문에 서보모터를 정회전시켜 다시 납땜을 재가열한다. 이로써, 전자부품이나 회로기판에 무리한 부하를 작용시키는 일 없이, 안전하고 확실하게 전자부품을 분리할 수 있다.

### III. 실험

앞에서 설계하고 기술한 것을 실제의 장치를 그림 4와 같이 제작하였다.

제작한 장치에 대하여 온도 프로파일에 대한 변동 특성과 재작업에서 각 영역의 온도 분포를 분석하고 보이드 문제에 대한 검증은 하였다.

그림 5는 solder cream(paste)을 사용하여 PCB에서 부품을 납땀시 부품 표면, soldering area과 PCB에서 납의 특성 곡선을 나타내는데 업체에서 제공하는 lead free용 solder cream의 온도 프로파일(profile)과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 250℃ 이상이 되면 열쇼크(thermal shock)가 발생하여 IC가 파괴되는데 측정된 그림은 침두온도가 226℃ 이하로 PCB와 BGA에 어떠한 손상도 미치지 않게 된다.

다음으로 PCB에서 부품을 제거하기 위하여 IR heater로 열을 가할 때 BGA부품 표면, soldering area과 PCB에 열전대(thermocouple)를 장착하여 온도특성을 측정하였다.

그림 6은 3개의 영역에서 거의 동일한 온도 특성을

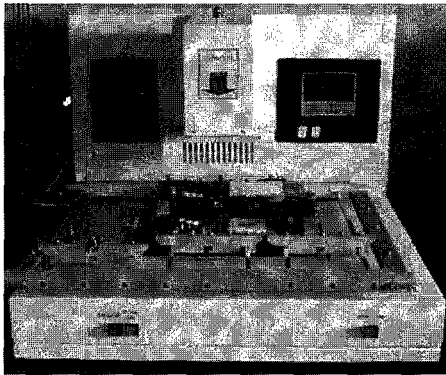


그림 4. 실제 장비의 구현  
Fig. 4. System implementation.

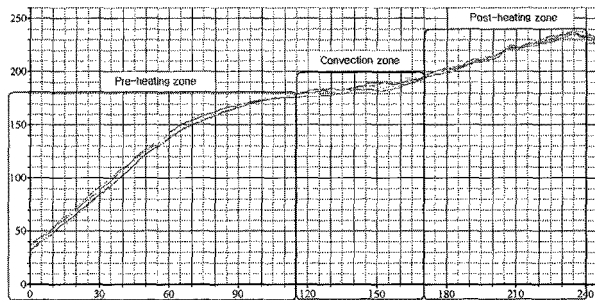


그림 5. BGA 솔더링에 대한 온도 프로파일  
Fig. 5. Temperature profile for soldering BGA under safety condition.

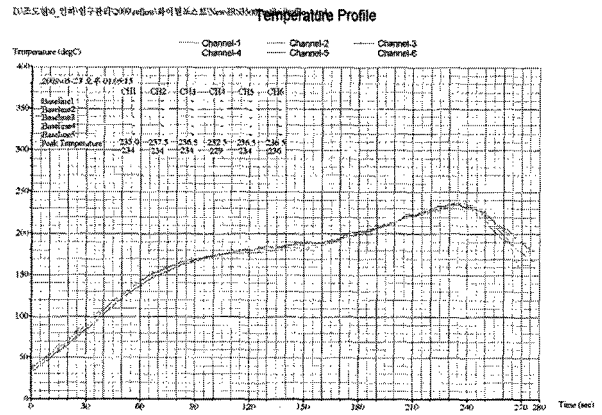


그림 6. BGA의 솔더링 제거를 위한 온도 프로파일  
Fig. 6. Temperature profile for De-soldering BGA under safety condition.

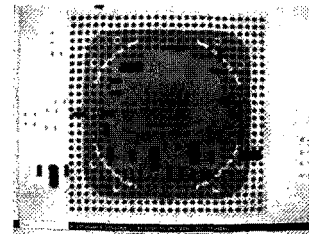


그림 7. X-ray를 사용하여 검사한 BGA의 보이드 검사  
Fig. 7. Void Checking for BGA using X-ray.

나타내고 있는데, 이것은 열방사가 일정하다는 증거이다. 열풍 방식에서는 이 특성이 불일치한다.

침두 온도 값이 224.5℃이하가 되므로 PCB와 BGA에 어떠한 손상도 발생하지 않는다.

마지막으로 그림 7은 IR heater를 사용하여 솔더링한 후 그림은 X-Ray를 사용하여 BGA에서 솔더링 성능을 검사한 것으로 솔더링 과정에서 보이드가 발생하지 않았다는 것을 보여 준다.

보이드는 납땀의 양불 판정의 기준이 되는 것으로 보이드가 많이 발생하면 solder bridge, opens와 colder solder의 원인이 된다. 그러므로 BGA 등과 같은 소형의 첨단부품들의 장착에서 보이드가 적게 발생하는 것은 매우 중요하다.

### IV. 결론

본 논문은 다파장 IR을 사용하여 회로기판에 전자부품을 탈부착하는 방법과 장치를 구현한 것이다. 다파장 IR을 각각 선택적으로 공급하여 회로기판과 전자부품 등의 손상을 방지할 수 있는 장점이 있다. 또한 열풍방식처럼 전자부품에 작용하는 풍압이 없으므로, 안정된

납땜을 수행할 수 있는 효과가 있다.

구현한 시스템은 상/하단의 IR heater를 별도로 제어하여 다양한 종류의 PCB, SMD와 삽입부품까지도 안전하고 완벽하게 탈부착이 가능하고, 비접촉식 적외선 온도 센서를 사용하여 솔더링 부품에 물리적인 힘을 가하지 않으므로 자연스러운 재작업이 용이하다.

열풍 방식처럼 노즐을 사용하지 않으므로 세라믹 30층 이상의 다층 기판의 재작업과 100mm규격 이내의 플라스틱 커넥터와 플라스틱 소켓을 PCB나 인접 부품 손상 없이 완벽하게 탈부착작업이 가능하다.

BGA/CSP 등과 같은 패키지 부품에서 자주 발생하는 보이드 문제를 근원적으로 제거할 수 있으며, 단과장 IR과 달리 다과장 IR은 BGA를 투과해 솔더 볼에 직접 열을 가하거나 보드에 반사해 볼에 열을 가할 수 있어 솔더 볼이 재응착 되어 보이드 없이 솔더링 가능하다.

## 참 고 문 헌

- [1] Suhir E., "The future of microelectronics and photonics and the role of mechanics and materials", *ASME J Electron Packag* 120, pp. 1-11, 1998.
- [2] Chiang KN, Liu ZN, Peng CT, "Parametric reliability analysis of no-underfill flip chip package", *IEEE Trans Comp Packag Technol*, pp. 635-640, 2001.
- [3] Sawada Y, Harada K, Fujioka H., "Study of package warp behavior for high-performance flip-chip BGA", *Microelectron Reliab*, pp. 465 - 471, 2003.
- [4] Rzepka S, Korhonen MA, Meusel E, Li CY, "The effect of underfill and underfill delamination on the thermal stress in flip-chip solder joints", *ASME J Electron Packag*, pp. 342 - 348, 1998.
- [5] Madenci E, Shkarayev S, Mahajan R., "Potential failure sites in a flip-chip package with and without underfill", *ASME J Electron Packag*, pp. 336 - 341, 1998.
- [6] Stiteler MR, Ume IC, Leutz B., "In-process board warpage measurement in a lab scale wave soldering oven", *IEEE Trans Comp Packag Manufact Technol -Part A*, pp. 562 - 569, 1996.
- [7] Liu S, Mei Y., "Behaviors of delaminated plastic IC packages subjected to encapsulation cooling, moisture absorption and wave soldering", *IEEE*

*Trans Comp Packag Manufact Technol -Part A*, pp. 634 - 645, 1995.

- [8] Sasaki K, Yanagimoto A, Ishikawa H., "Effect of lead and lead-free solders on bend of substrate", *Proceedings of advanced technology in experimental mechanics ATEM03*, OS10W0040, 2003.
- [9] Driel WD, Zhang GQ, Janssen JHJ, Ernst LJ, Su F, Chian KS, et al., "Prediction and verification of process induced warpage of electronic packages", *Microelectron Reliab*, pp. 765 - 774, 2003.
- [10] McCluskey, R. Munamarty, M. Pecht, "Popcrning in PBGA Packages During IR Reflow Soldering", *Microelectronics International*, vol. 14 Issue 1, pp 20-23, 1997.
- [11] 氏家 一夫, "表面実装型 IC·LSI 패키지의取外し方法及びこれに用いる取外し器具", 日本特許 特開平8-46351, 1996.2.16
- [12] 松本 清, "光空間伝送装置および 光空間伝送 システム", 日本特許 特開2002-164646, 2002.6.7
- [13] 松本 清, "電子部品のハンダ付け、取り外し装置", 日本特許 特開2006-294958, 2006.10.26

## 저 자 소 개



조 도 현(정회원)

1990년 광운대학교 전자공학과 석사 졸업.

1998년 광운대학교 제어계측 공학과 박사 졸업.

1991년 LG전자 중앙연구소 근무

1998년 삼성종합기술원 근무

현재 인하공업대학 디지털전자과 교수

<주관심분야 : 제어계측공학, 로봇제어, 회로 및 시스템 설계>