

솔더링부의 금속학적 특성 및 강도 평가

이재식·정재필·김숙환

Evaluation of Metallurgical Characteristics and Strength on Soldered Joint

Jae Sik Lee, Jae Phil Jung, and Sook Hwan Kim

1. 서론

어떠한 시스템의 신뢰성은 예견된 수명을 통하여 정해진 레벨을 유지하는 능력으로서 정의될 수 있다¹⁾. 이러한 시스템의 수명은 여러 요인에 의해 영향을 받지만, 재료적 불연속부가 되는 접합 혹은 조립부가 신뢰성에 악영향을 미친다는 것은 익히 알려진 것이다. 최근 전자 제품의 고집적화와 솔더의 무연화에 따라 솔더링부의 평가와 신뢰성에 관한 관심이 증대되고 있다. 과거 30년 동안의 솔더링부의 신뢰성과 강도는 개연성(probability)과 통계를 이용하여 왔다²⁾. 그러나, 무연 솔더의 등장과 관련하여, 아직 충분한 신뢰성 시험 결과나 통계적 데이터가 축적되어 있지 않아 어려움이 따르고 있으며, 국내외적으로 솔더링부에 대한 연구와 시험평가 방법이 좀 더 세밀하게 검토되고, 보완되어야 할 것으로 보인다. 솔더링부의 신뢰성은 솔더가 PCB(Printed Circuit Board)에 전기적 그리고 기계적 접합을 이루는데 사용된 이래로 전자 패키징에서 매우 중요하게 취급되어 왔다³⁾. 솔더링부의 신뢰성과 관련하여서는 금속학적인 면과, 강도적 측면, 전기적, 화학적 측면이 있을 것이다. 본 고에서는 솔더링부의 금속학적 특성과 강도 평가법에 관한 기초적인 내용을 기술하고자 하며, 보다 상세하고 일반적인 신뢰성에 관한 내용은 문헌⁴⁻⁶⁾을 참고하기 바란다.

2. 무연 솔더의 정의

무연 솔더에 포함된 불순물도 기존의 유연 솔더에 포함된 불순물에서는 고려치 못했던 악영향을 미칠 수 있다. 예로써, Sn-3.5Ag-0.7Cu에 Cu와 Pd가 불순물로 함유되면 브리지 발생을 증가시키며, Pb 함량의 증가는 젓음성곡선의 영점시간(zero cross time)을 감소시킨다. 또한, Pb 함량의 증가는 Sn-Ag-Pb 혹은 Sn-Bi-Pb 등의 저융점 원소를 형성하여 솔더링부의 고온강도

저하나 재용융에 의한 균열을 유발하기도 한다. 따라서, 무연 솔더의 불순물 함량 범위를 규정할 필요가 있는데, 특히 Pb 함량의 규정이 중요하다. 무연 솔더의 종류에 따라 다르지만, Pb의 불순물 함량의 범위는 ISO나 JIS에서는 최대 약 0.05-0.1% 정도이다. 반면, 미국의 JEDEC에서는 무연의 정의를 '원소로서 Pb의 함량이 0.2% 미만'으로 발표하였다. Table 1은 ISO에서 규정한 무연 솔더 중 Pb의 불순물 함량의 범위를 보인 것이다.

3. 조직검사

솔더링 접합부는 솔더 금속과 리드, 동 패드 등 금속 부로 이루어져 있다. 이러한 금속부는 용융, 응고, 사용 중 시효 과정을 거치면서, 기체와의 반응이나 불순물 집적에 의한 결함이나 확산을 통한 금속간 화합물의 생성과 성장 등 복잡하고 많은 현상이 발생한다. 이러한 현상들은 많은 연구와 노력으로 정밀하게 제어하여 솔더링부의 신뢰성을 높이고자 노력하고 있으나, 근본적으로 발생을 피하기는 어렵다. 따라서, 솔더링 접합부의 금속학적 특성을 평가하기 위한 방법으로 솔더링부의 금속조직을 조사한다. 광학 현미경으로는 대략적인

Table 1 ISO에서 규정한 무연 솔더 중의 납(Pb) 허용 함량 범위

무연 솔더의 종류	납(Pb) 허용 함량 (%)
Sn95Sb5	0.10 Max
Bi57Sn43	0.05 Max
Sn99Cu1	0.10 Max
Sn97Cu3	0.10 Max
Sn50In50	0.05 Max
Sn96Ag4	0.10 Max
Sn97Ag3	0.10 Max

조직이나, 결합, 등을 관찰한다. Fig. 1은 솔더링부에 발생한 균열(lift off 혹은 fillet lifting)의 예를 나타내고 있다. 리프트 어프가 발생하는 이유는 Bi나, Pb 등 저융점 금속이 솔더 베스로부터 열이 전달되어 늦게 응고되는 동(Cu) 랜드 부근에 집적되어 발생하는 것으로 알려져 있다 (Fig. 2참조)⁷⁾. 이 때, 응고와 냉각에 따른 솔더의 수축과 기판의 냉각에 따른 수축이 리프트 어프 발생을 용이하게 한다.

리프트 어프를 방지하기 위한 방안으로는, 솔더링부를 급냉하여 수지상(dendrite) 조직을 억제하고, 편석을 감소시킨다. 수냉으로 완벽하게 제어가 가능하다. Fig. 3은 Sn-Pb 도금된 리드에 대해 Sn7.5Bi3.5Ag0.7Cu 솔더와 Sn3.5Ag0.7Cu 솔더의 냉각 속도에 따른 리프트 어프 발생율을 보인 것이다. Sn3.5Ag0.7Cu의 경우, 냉각속도 20℃/s일 때 리프트 어프의 발생이 거의 사라진 것을 볼 수 있다.

한편, 냉각 중 리프트 어프가 발생하기 전에 온도 강하를 중지시키고 서냉하면 어닐링 효과가 나타나 Bi의 솔더내 편석을 촉진시키고, 계면의 편석을 억제하여 리프트 어프가 감소되기도 한다. 이외에도 솔더에 합금 원소를 첨가하거나, Cu를 통한 열전도의 억제, 기판의 방열을 고려한 설계 등이 리프트 어프의 억제책으로 제시되고 있다.

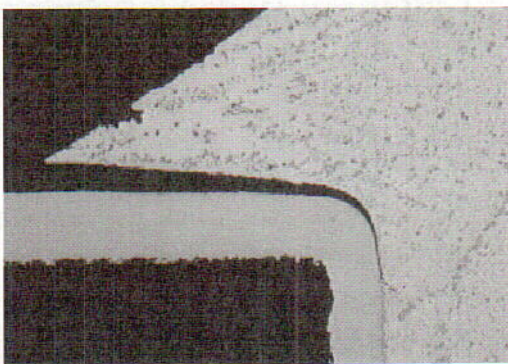


Fig. 1 광학 현미경으로 관찰한 솔더링부의 lift-off

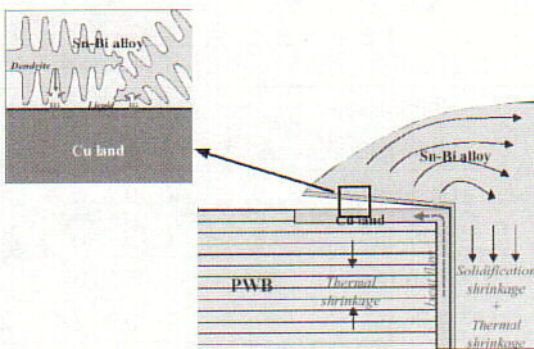


Fig. 2 Lift-off의 발생 기구⁽¹⁾

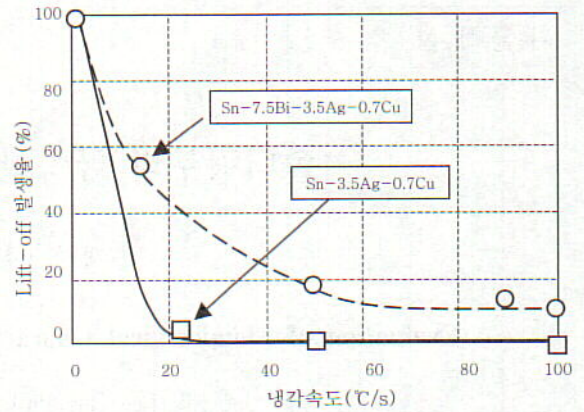


Fig. 3 Sn-Pb 도금된 리드의 무연 솔더에 따른 리프트 어프 발생율⁸⁾

4. 금속간 화합물

솔더링 접합부에서는 솔더링 중 또는 솔더링 후 전자제품의 사용 중에 Sn계 솔더와 Cu 등 모재 또는 솔더와 Ni, Ag, Au 등 도금층 사이에 금속간화합물이 성장된다. 특히, 전자부품의 고집적 고성능화에 따라 접합부에 발열량이 많아지고, 장기간 사용에 의해 금속간 화합물의 성장이 촉진된다.

계면에 금속간 화합물의 성장되면, 젖음성의 저하, 접합강도의 저하, 전기저항의 증대 등과 같은 문제점을 유발한다.

계면에서 발생하는 금속간 화합물의 두께(d)는 다음과 같은 수식으로 계산할 수 있다.

$$d = k\sqrt{Dt} \tag{1}$$

$$\text{단, } D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

여기서,

k : 상수, D : 확산계수

t : 시간, D_0 : 진동인자

Q : 활성화 에너지, R : 기체상수

T : 유지온도(K)

Fig. 4는 Sn3.5Ag0.75Cu 솔더와 동 패드⁹⁾, Sn3Ag8Bi5In 솔더와 Ni층 사이¹⁰⁾에서 발생한 금속간 화합물의 예를 보인 것이다.

전자제품의 사용에 의해 솔더링부가 발열되고 시간이 지나 시효되면, 계면의 금속간 화합물층뿐만 아니라 솔더 내부의 금속간 화합물과 솔더링부의 미세 조직이 조대화 되어 취성을 띠게 되면서 시효강도가 저하된다.

Fig. 5는 Sn3Ag8Bi5In 조성을 갖는 BGA 솔더 볼

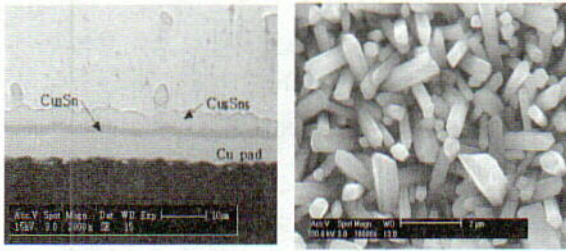


Fig. 4 Sn-3.5Ag-0.75Cu/Cu 패드(150℃ 600시간 시효)⁹⁾와 Sn3Ag8Bi5In 솔더/Ni층 사이에 형성된 금속간 화합물¹⁰⁾

의 시효온도 100℃에서 시효시간에 따른 접합부 시효강도 측정결과를 보인 것이다¹⁰⁾. Sn3Ag8Bi5In 솔더의 경우, 시효시간 증가에 따라 시효 후 약 4일 혹은 9일 후에 최대 강도를 보였는데, 시효시간에 따른 강도 변화는 그다지 크지 않은 것으로 보고되었다.

솔더링 시간 변화에 따라 금속간화합물의 조성이 변화되기도 한다^{11,12)}. 예를 들어, Sn-3.5Ag 솔더와 Au/Ni/Cu/Ti 층 모재와의 계면에, 솔더링 초기에는 Ni₃Sn₄가 나타나지만, 이후 시간이 지나면 Cu가 Ni₃Sn₄로 확산되어 들어가 (Ni, Cu)₆Sn₅로 변화가 진행된다¹²⁾

Table 2는 솔더링 시간을 10분 정도로 하였을 때, Sn-3.9Ag 무연 솔더에 Cu를 첨가함에 따라 솔더와 Au/Ni/Cu 패드 사이의 계면에서 생성되는 금속간 화합물의 종류를 나타낸 것이다.

Table에서 보듯이 Cu가 첨가되지 않은 경우에는 Ni₃Sn₄가 나타나지만, Cu가 첨가되면 Cu가 Ni₃Sn₄로 확산되어 들어가 (Ni, Cu)₃Sn₄, (Ni, Cu)₆Sn₅ 등이 나타나기도 한다¹³⁾.

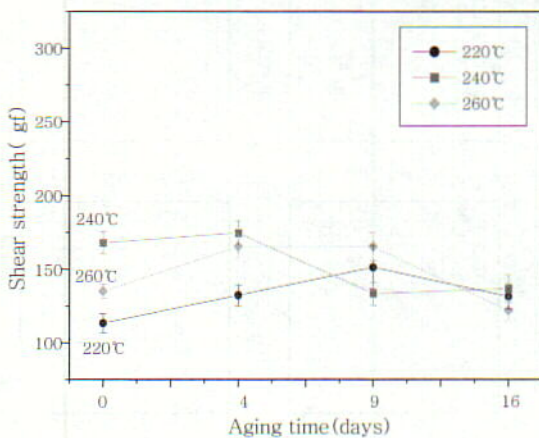


Fig. 5 Sn3Ag8Bi5In 조성을 갖는 BGA 솔더 볼의 시효 온도 100℃에서 시효시간에 따른 접합부 시효강도 측정결과

Table 2 솔더와 Au/Ni/Cu 패드 사이의 계면에서 생성되는 금속간 화합물의 종류

Solder(wt%)	Reaction products at 10minutes
Sn3.9Ag	Ni ₃ Sn ₄
Sn3.9Ag0.2Cu	(Ni _{0.86} Cu _{0.14}) ₃ Sn ₄
Sn3.9Ag0.4Cu	(Cu _{0.58} Ni _{0.42}) ₆ Sn ₅ */(Ni _{0.83} Cu _{0.17}) ₃ Sn ₄
Sn3.9Ag0.5Cu	(Cu _{0.58} Ni _{0.42}) ₆ Sn ₅ /(Ni _{0.84} Cu _{0.36}) ₃ Sn ₄
Sn3.9Ag0.6Cu	(Cu _{0.60} Ni _{0.40}) ₆ Sn ₅
Sn3.9Ag0.7Cu	(Cu _{0.63} Ni _{0.37}) ₆ Sn ₅
Sn3.9Ag0.8Cu	(Cu _{0.66} Ni _{0.34}) ₆ Sn ₅
Sn3.9Ag1.0Cu	(Cu _{0.80} Ni _{0.20}) ₆ Sn ₅
Sn3.9Ag3.0Cu	(Cu _{0.91} Ni _{0.09}) ₆ Sn ₅

5. 인장시험

인장시험은 솔더링 접합부의 경우 Fig. 6에 보인 바와 같이 기판과 45°의 방향으로 접합된 리드를 당겨 시험한다. 인장시험은 변형속도를 변화시킬 수 있는 일반적인 인장시험기를 사용하여, 시편이 파괴될 때까지 일정한 속도로 당긴다. Fig. 7은 인장시험기의 예를 보인 것이다.

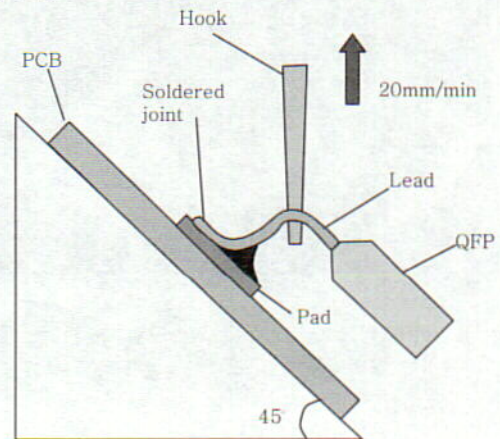


Fig. 6 인장시험방법



Fig. 7 인장시험기의 예

Fig. 8은 QFP 리드 솔더링부의 인장시험 후 파단면의 주사전자현미경 사진을 보인 것이다. 이 그림에서 보듯이, 인장시험에서 파단강도의 측정 이외에 파단면을 관찰함으로써, 솔더링부의 기포나 이물질의 존재 여부 등을 관찰할 수 있다. 무연 솔더의 경우, 솔더의 패드에 대한 젖음성 저하 (특히, Sn-Zn계)나 용융 솔더의 표면장력 증가 등이 기포 발생을 증가시킬 수 있으며, 플럭스의 개량 등이 필요하다.

한편, Fig. 9(a)는 BGA(Ball Grid Array) 또는 CSP(Chip Scale Package)와 같은 패키지의 솔더 볼 접합부의 인장시험 방법을 보인 것이다. 볼의 인장강도는 상온에서 행하는 상온식 인장시험과 가열 상태에서 행하는 가열식 인장시험이 있다. Sn-3.5Ag-0.75Cu, Sn-2Ag-3Bi-0.75Cu, Sn-3.5Ag-6Bi, Sn-57Bi-1Ag 솔더 범프의 인장 시험 결과, 상온식 및 가열식 모두 Sn-3.5Ag-0.75Cu, Sn-2Ag-3Bi-0.75Cu, Sn-3.5Ag-6Bi 솔더의 인장강도가 Sn-37Pb에 비해 비슷하거나 유사하며, Sn-57Bi-1Ag는 약간 떨어지는 것으로 보고되고 있다⁷⁾. 한편, 삽입 부품의 인장강도는 아래 Fig. 9(b)와 같이 기판에 리드가 삽입된 상태로 솔더링된 시편을

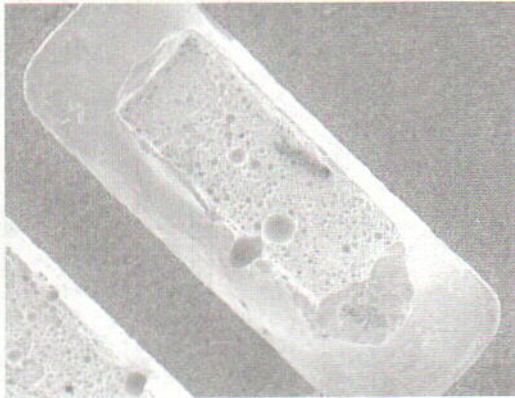


Fig. 8 QFP 리드 솔더링부의 인장시험 후 파단면에서 관찰된 솔더링부의 기포

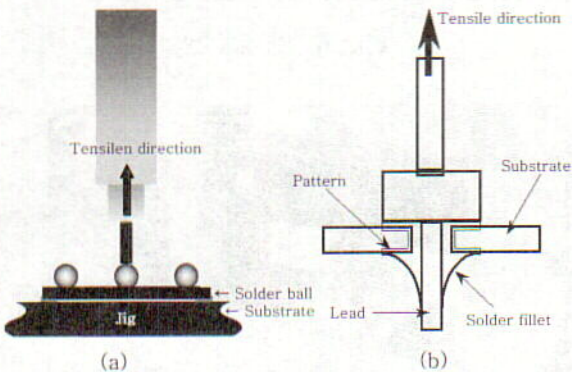


Fig. 9 솔더 볼 집합부(a)와 삽입실장형 부품의 인장시험 방법(b)

인장시험기를 사용하여 인장할 수 있다.

Fig. 10은 표면실장 부품의 강도평가용 무연 솔더링 온도 곡선의 예를 보인 것이다. 기존의 Sn-37Pb 유연 솔더일 경우의 예열 (80-130℃) 및 최고 솔더링 온도 (240-250℃)에 비해, 예열 온도가 증가하였다.

인장 시험을 행하는 집합부는 보통, 재현성이 있어야 하며, 가장 알기 쉽게 응력이 걸리는 쪽을 택하며, 제품과 동일한 건본을 제작하여 각각의 규격에 맞는 인장강도의 목표 값을 설정하여 평가한다.

Fig. 11은 QFP 리드 솔더링부의 솔더 조성 및 솔더링 온도에 따른 인장시험 결과를 보인 것이다. 그림에서 보듯이, 솔더링 온도가 솔더의 용점보다 약 5℃ 이상만 높으면 솔더링 온도 증가에 따른 인장강도 증가는 미소한 것으로 보고되고 있다.

6. 전단강도

솔더 볼의 전단시험은 솔더링부의 집합강도 평가뿐만 아니라, 집합부의 파단이 계면을 따라 발생하기 쉬우므로

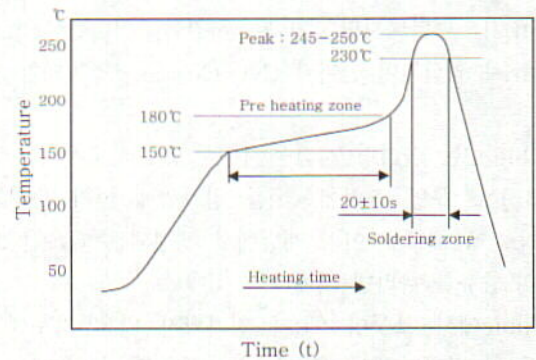


Fig. 10 표면실장 부품의 강도평가용 솔더링 온도 곡선

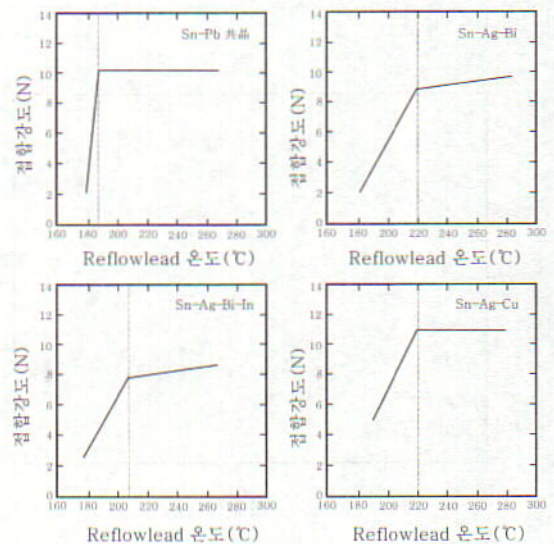


Fig. 11 QFP 리드 솔더링부의 솔더 조성 및 솔더링 온도에 따른 인장시험 결과

로 접합계면의 특성을 파악하는데도 도움이 되는 접합 방법이다. 또한, 접합계면의 파단형상이나 기공(氣孔)의 존재 등도 파악할 수 있다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 미세전단 시험기와 전단시험 방법을 보인 것이다.

JEDEC의 솔더 볼 전단시험법에서는 전단시험 장치의 툴(tool)과 기판과의 거리를 적어도 0.05mm 이상으로 하되 기판에서 볼 지름의 1/4 이상 떨어져서는 안되며, 볼의 접합부 높이에서 볼의 반지름을 뺀 값의 1/2 만큼 간격을 유지하도록 하고 있다. 예를 들어, 0.5mm의 솔더 볼을 사용한다면, 툴(tool)과 기판과의 거리는 약 75 μ m가 된다.

7. 박리시험

박리시험 (peel test)은 솔더링된 전자부품을 당겨 박리시켜서 전자부품 접합부의 접합강도를 정량적으로 평가할 수 있는 방법이다. 파단 상태로부터 강도가 충분한 지, 접합계면의 박리 및 접합상태의 양호 여부를 판단할 수 있다. Fig. 14는 박리시험 방법을 나타낸 것이다.



Fig. 12 미세전단 시험기

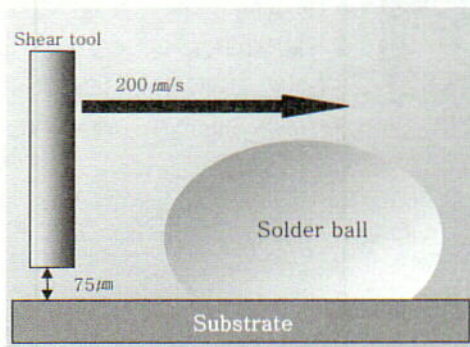


Fig. 13 솔더 볼의 미세 전단시험 예

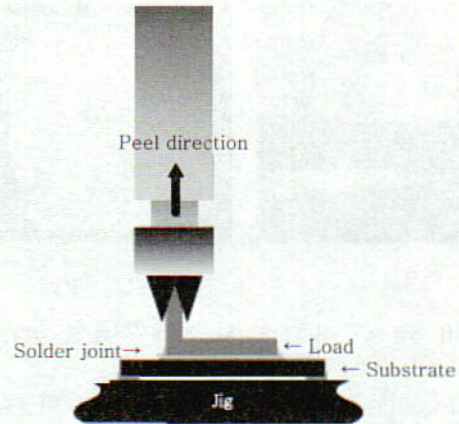


Fig. 14 박리 시험

박리시험은 기판상의 전자부품 접합용 단자 막의 강도를 평가하는데 사용하기도 하고, 기판에 형성되는 레진 등 유기피막의 박리강도를 평가하는데 사용되기도 한다.

8. 굽힘시험

기판은 사용 중 휘는 현상이 발생할 수 있기 때문에, 이러한 상태에서 전자부품의 접합강도를 측정하는 데에 굽힘 시험법이 사용될 수 있다. 실장부품의 굽힘시험의 예를 Fig. 15에 나타내었다.

일본에서 제안된 아래의 굽힘 시험의 예에서는 굽힘 시험의 스패(span)는 45mm, 90mm 의 2종류로 한다. 또 하중을 가하는 속도는 5mm/min로 하고, 기판 및 부품의 크기, 랜드 형상은 각자 실험 목적에 맞게 설정할 수 있다.

한편, Lau 등이 시험한 PBGA 어셈블리 솔더링부에서의 3점 굽힘 시험장치^{2,14-15})와 솔더링부에 발생한 균열시험의 예를 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서, 152.4mm의 스패(span)으로 시험 기판의 양쪽 끝을 받친다. 하중은 3.82mm/min의 속도로 시험 기판의 중앙에 가한다.

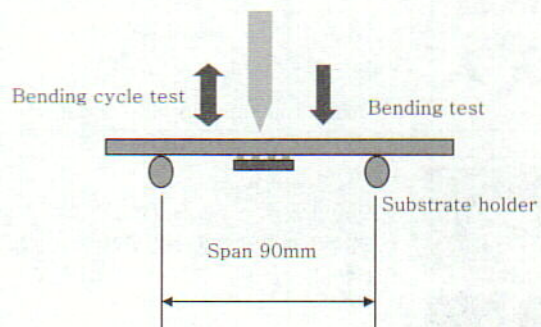


Fig. 15 실장부품의 굽힘 시험의 예

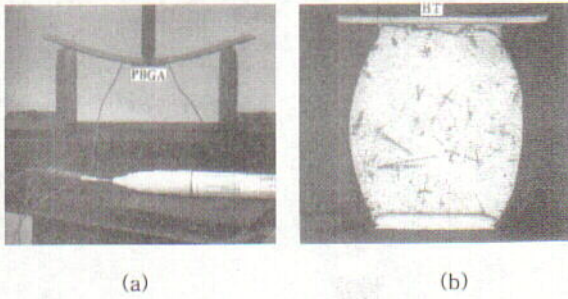


Fig. 16 3점 굽힘 시험기 (a)와 솔더링부의 균열 (b)^{2,14-15)}

PBGA 어셈블리 솔더링부에서의 4점 비틀림(four-point twisting)^{2,14-15)} 시험기와 솔더링부의 균열 발생 예를 Fig. 17에 나타내었다.

기판의 크기는 152.4×152.4×1.58mm이고, 중앙에 QFP가 위치해 있다. 2개의 반대 쪽 모서리(corner)에 하중을 가하며, 하중을 가하는 속도는 3.82mm/min로 하였다. 이 시편에서 시편의 모서리는 하중을 가하는 동시에 기판을 지지하기 위하여, 정확하게 기판의 모서리가 아니라 실제적인 모서리에서부터 3.2mm 떨어져 있도록 하였다. 따라서, 하중을 가하는 곳과 기판을 지지하는 곳 간의 거리는 146mm이다.

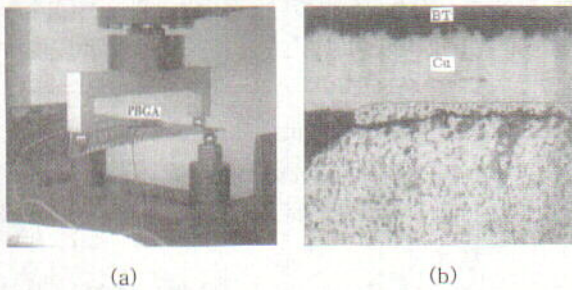


Fig. 17 Twisting 시험기(a) 와 솔더 조인트 크랙(b)^{2,14-15)}

참 고 문 헌

1. J. H. Lau. Handbook of Fine Pitch Surface Mount Technology. (1993)
2. J. H. Lau., and Yi-Hsin Pao., Solderjoint reliability of BGA, CSP, Flip Chip, and Fine pitch SMT Assemblies. (1997)
3. X. Ma., Y.Y. Qian., F. Liu., and F. Yoshida. High Reliable Solder Joint Using Sn-Pb-La Solder Alloy, Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, (2001).
4. Jeanotte, D.A., Goldman, L.S., and Howard, R.T., Microelectronics Packaging Handbook (1989)
5. Marsh, L.L., Evans, R.D., Wang, S.C., Malack, J.A., and Ulsh, H.B., Reliability and Testing, Principles of Electronic Packaging (1989)
6. Evans, H., O'Hara, J.P., and Viswanadhm, P., Handbook of Tape Automated Bonding. (1992)
7. 鉛 フリ - はんだ에 관한 조사연구성과보고서, 일본전자공업진흥협회
8. Suganuma, 鉛 フ리 - はんだ에 付 け 技 術, 工 業 調 査 會, (2000), 142
9. 정재필, 신영의, 임승수 무연 마이크로 솔더링. (2001)
10. 김문일, 서울시립대 석사논문(2002)
11. M.K.Kim, J.K.Moon and J.P.Jung: Mater. Trans. (submitted), (2002)
12. J.Y. Park, C.W. Yang, J.S. Ha, C.U. Kim, E.J. Kwon, S.B. Jung, and C.S. Kang: J. Electronic Materials **30**(2001) 1165-1170
13. C.E.Ho, Y.L.Lin and C.R.Kao, Chem. Mater., American Chemical Society, (2002) (to be published)
14. Lau, J. Solder Joint Reliability of Flip Chip and Plastic Ball Grid Array Assemblies Under Thermal, Mechanical, and Vibration Condition. Proceedings of japan International Electronic Manufacturing Technology Symposium, December(1995)
15. Lau, J., K. Gratalo, E. Schneider, T. Marcotte, and T.Baker, Solder Joint Reliability of Large Plastic Ball Grid Array Assemblies Under Bending, Twisting, and Vibration Condition, Circuit world, October (1995)



- 이재식 (李在植)
- 1975년생
- 서울시립대학교 신소재공학과
- 마이크로 조이닝
- e-mail: studbumpflipchip@empal.com



- 정재필 (鄭在弼)
- 1959년생
- 서울시립대학교 신소재공학과
- 솔더링, 브레이징, 마이크로 조이닝
- e-mail: jppjung@uoscc.uos.ac.kr



- 김숙환 (金肅煥)
- 1959년생
- 포항산업과학연구원 용접센터
- 브레이징, 솔더링, 고에너지용접(EBW), 용접야금
- e-mail: weldksh@rist.re.kr