



Pb-free화의 진행현황 및 작업성/신뢰성 평가

김우영·김인철·노보인

The Estimate of Progress Conditions and Operation Property/Reliability of Pb-Free

Woo-Young Kim, In-Chul Kim and Bo-In Noh

1. 서론

Pb-free화의 진행 현황

납의 규제가 기정사실화 되면서 Solder Maker들은 납(Pb)을 대체할 만한 금속을 찾기 위해 지난 10여년간 지구상에 존재하는 거의 모든 금속을 시험해왔다고 해도 과언이 아니다. 그중 대표적인 것이 Sn, Ag, Bi, In, Zn, Au, Cu, Pd, Sb 등이다.

위의 후보 금속들은 지구상에서 쉽게 구할 수 있고, 용점을 높지 않게 만들 수 있으므로 향후 Pb-free화를 진행하는데 있어서 가장 강력한 후보 금속이라고 말할 수 있을 것이다. 그러나 상기 후보 금속들 중 어떠한 조합으로 해서 새로운 Solder를 만들더라도 현재의 Solder 가격보다 몇 배 이상 상승할 것이 확실시된다.

전자 제품을 제조하는 업체에게는 또 다른 원가 상승요인이 발생하게 될 것이다. 따라서 Pb-free Solder를 선택하는 기준에는 작업성 및 신뢰성과 함께 가격도 매우 중요한 변수가 될 것이다. 또한 각국의 Solder Maker에서 지적 재산권을 출원하고 있으므로 특허에 저촉되지 않는가를 반드시 확인하고 사용해야 할 것이다. 특허는 속지주의 원칙에 따르고 있다. 특허가 출원/등록되어 있는 국가 안에서만 그 권리를 보호받게 된다. 가령 일본의 A라는 Solder Maker가 미국에 출원/등록한 특허를 한국에는 출원하지 않았을 경우의 예를 들어보자. A사는 한국에 출원/등록하지 않았으므로 한국에서는 권리를 인정받지 못한다. 따라서 한국의 B라는 제조회사는 A사의 특허를 이용하여 Solder의 제조 및 국내 판매가 가능하다. 그러나 A사의 특허를 이용한 Solder를 사용하여 제조된 부품 및 완제품을 미국에 수출하면 문제가 되는 것이다. 또 한가지 잘못 판단하여 낭패를 보는 경우는 B사가 A사의 특허를 이용한 Solder를 사용하여 제조된 부품을 대만의 C사에 수출하였는데, C사가 그 사실(A사의 특허를 이용한 사실)

을 잘 알지 못하고 미국에 판매하였을 경우에는 B사 및 C사 모두 A사의 특허권을 침해하는 경우가 되므로 주의하지 않으면 안 된다. 현재 세계적으로 특허권의 정리가 완료된 Pb-free Solder는 Sn-Ag-Cu계의 Solder이다.

Sn-Ag-Cu계 외의 나머지 다른 조성의 Solder를 적용할 경우에는 반드시 Solder 업체에 특허 관련하여 아무런 문제가 없다는 것을 서류로 제출하도록 해야 할 것이다.

단계적 Pb-free화 일정

현재 유력시되는 Pb-free Solder는 대부분 용점이 현재의 공정 Solder보다 최소 30℃ 이상 높으므로 작업성이 좋지 않고 부품의 내열성도 보장되어 있지 않으므로 부품 Maker에서도 Pb-free화를 단계적으로 추진하면서 동시에 내열성 확보에 총력을 기울이고 있다. Set Maker의 입장에서는 부품의 Pb-free화가 진행되지 않으면 진정한 의미의 완전한 Pb-free라고 말할 수

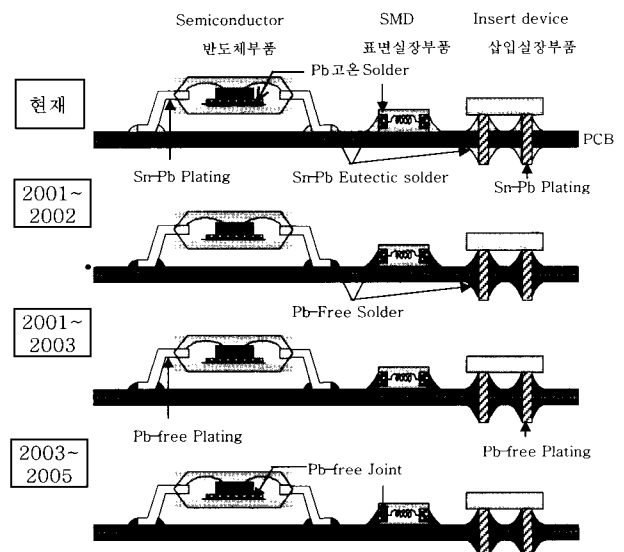


Fig. 1 Pb-free progress course

없기 때문에 부품 Maker에서 먼저 부품의 내열성 확보(250℃) 및 부품의 Pb-free화를 진행하도록 종용하고 있는 실정이다.

부품 Maker 및 Set Maker에서 단계적으로 진행하고 있는 Pb-free화의 예상 일정을 그림으로 나타내 보았다.

Pb-free 관련 특허

Pb-free Solder중 가장 강력한 후보로 여겨졌던 Sn-Ag-Cu계 Solder의 지적 재산권과 관련하여 그동안 일본의 센주-마쯔시다 와 미국의 IOWA 주립대와 장시간에 걸쳐 협상을 벌여 2001년 2월에 완전합의에 이르렀고 상호 특허 공동사용에 관한 계약(Cross License)이 맺어졌다.

문제가 되었던 부분은 아래의 도표에서 알 수 있듯이 Ag의 범위와 Cu의 범위가 중첩되어 상호 특허 범위를 침해할 가능성이 높다는 것이다.

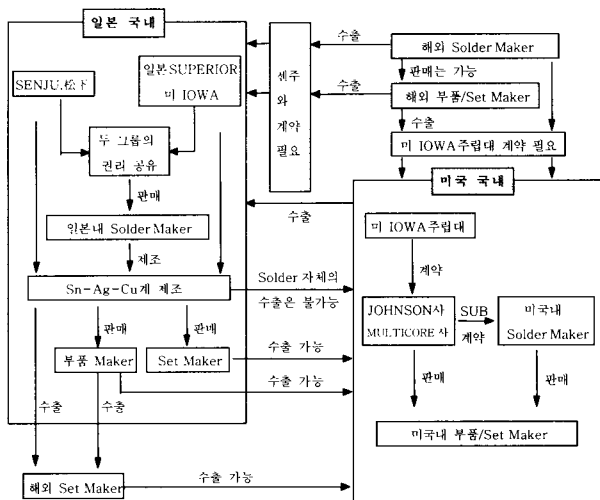
다만 미국의 IOWA주립대는 비영리 단체이므로 직접 제조하지 않고, 특허의 통상 실시권을 미국의 JOHNSON사, 영국의 MULTICORE사, 일본의 SUPERIOR사에 판매하였다.

Sn-Ag-Cu계의 Solder의 적용을 검토하고 있는 국

Table 1 Demand extent of USA/Japan application patent

Patent no	Sn	Ag	Cu	기타
JP3027441 (센주-마쯔시다)	Balance	3-5%	0.5~3%	Sb5%이하
USP5527628 (IOWA주립대)	Balance	3.5~7.7%	1~4%	Bi10%이하

Table 2 Sn-Ag-Cu patent enforcement



내의 제조 Maker에 도움이 될 수 있도록 특허 권리 관계를 도포로 만들어 보았다. (NIKKEI ELECTRONICS 2001년 5월호에서 발췌/번역한 것임)

주요 성분별 작업성/신뢰성 평가

현재 전 세계적으로 Pb-free Solder로서 개발된 것이 수십 종류에 달하고 있다. 우리 회사는 그렇게 많은 것들 중에서 어떤 것을 선택하여 제품에 적용할 것인가? 참으로 고민스러운 일이 아닐 수 없다. 가격, 신뢰성, 작업성 등을 고려하여 제품에 맞는 Solder를 선택해야 할 것이다. 여러 종류의 Solder 중에서 가장 유력한 후보 금속 조합 3개 모델(Sn-Ag-Cu계, Sn-Ag-Cu-Bi계, Sn-Ag-Cu-Sb계)을 선정하여 용점, 접합강도, 젖음성, 퍼짐성, Creep Test, 온도 Cycle 시험 등 6개 항목에 걸쳐 기존의 공정 Solder에 비해 작업성, 신뢰성이 어느 정도인지 평가하여 보았다.

2. 실험 방법

2.1 접합 강도 평가

부품과 PCB의 접합부인 납땜부의 납땜강도는 제품의 신뢰성을 평가하는 가장 간단한 방법이다. 이 시험에서 높은 접합 강도를 얻은 제품은 장/단기 신뢰성에서 우수한 성능을 보이는 것이 일반적이므로 꼭 필요한 시험이다.

- 1) Connector(9pin)을 시험용 기판에 삽입한다.
- 2) 납땜장치의 납땜조건을 Setting한다.
 - 가) 침적 시간 : 5 sec
 - 나) 침적 깊이 : 2 mm
 - 다) 속도 : 2.5mm/sec
 - 라) Pot 온도 : 250℃
- 3) 준비된 기판에 Flux를 도포한다.
- 4) 납땜장치를 이용하여 시험용 기판을 납땜한다.
- 5) 납땜이 완료된 기판중 납땜상태가 양호한 기판을 5매 이상 선별한다.
- 6) 인장강도계를 사용하여 납땜부가 파괴되어 분리될 때까지 힘을 가한다.

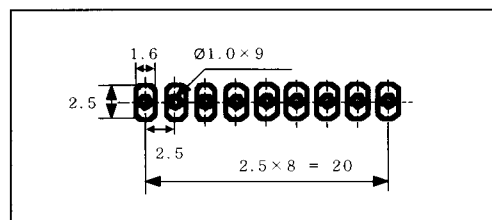


Fig. 2 Joint strength test sample PCB

(시험시 인장강도계의 속도는 10mm/min)

- 7) 측정된 Peak치의 납땜강도를 기록한다.
- 8) 나머지 시험기관에 대하여도 같은 방법으로 시험을 실시한다.

2.2 젖음성 평가

납땜재료(Solder)와 모재(PCB, 부품 등)를 Flux를 사용하여 납땜시 재료와 모재가 서로 접합하려고 하는 특성을 파악하기 위함이다.

- 1) 동판(30×7×0.3mm)의 표면을 연마지(#1200)를 사용하여 연마한다.
- 2) 연마된 시편을 I.P.A로 세정후 충분히 건조시킨다.
- 3) 납땜성 측정기의 조건을 Setting한다
 - 가) 침적시간 : 5 sec
 - 나) 침적깊이 : 2 mm
 - 다) 속도 : 2.5mm/sec
 - 라) POT온도 : 250℃
- 4) 시편에 Flux를 도포하여 측정기에 장착한다.
- 5) 측정기의 Start버튼을 눌러 시험을 실시한다.
- 6) 측정된 Data(Z/C Time, SV Force, PV Force)를 기록한다.
- 7) 위와 같은 방식으로 시험을 10회 실시한다.

2.3 퍼짐성 평가

PCB상의 Land는 주로 구리로 이루어져 있기 때문에 구리(Land)에서 Solder의 퍼짐성은 Soldering공정에서 필수적인 요건이다. 따라서 이러한 퍼짐율을 정량적으로 구하여 우수한 Solder를 선정하는 지표로 활용한다.

- 1) 탈산동판(30×30×0.3mm)을 청정하게 한다.
- 2) 시편을 150℃에서 1시간 동안 산화처리 한다.
- 3) 동판의 모서리 부분을 약간 구부러 편셋으로 잡기 편리하게 한다.
- 4) 약 0.3g의 Solder 무게를 정확히 측정후 동판 중앙부위에 올려 놓는다.
- 5) 동판위의 Solder에 약 0.05g의 Flux를 떨어뜨린다.
- 6) 용융납조의 온도를 Solder의 용융온도보다 40~50℃정도 높게 셋팅한 후 동판을 올려 놓는다.
- 7) 약 30초 정도 Solder를 용융시킨 후 상온에 방치하여 냉각시킨다.
- 8) I.P.A.를 사용하여 Flux 잔류분을 제거한다.
- 9) 땀납의 높이를 마이크로미터를 사용하여 측정한다.
- 10) 퍼짐율은 다음의 식에 의해 산출한다.

H : 퍼진 땀납의 높이(mm), V : 무게 / 비중,
D : Solder 지름(mm)

$$\text{퍼짐율}(\%) = \frac{D-H}{D} \times 100$$

$$D = 1.24 \times V^{1/3}$$

2.4 Creep 시험(130℃에서 1kg)

부품의 Lead선과 Solder와의 접합 부분의 신뢰성을 검증하기 위하여 일정 무게의 추를 매달아 Cu Lead가 낙하하기까지의 시간을 측정함으로써 130℃에서 연속적인 응력에 대항하는 납땜접합부의 안정성을 파악하기 위함이다.

- 1) Cu Lead선을 약 10cm 크기로 준비한다.
- 2) 시험용 기관에 Cu Lead선을 고정하여 Soldering을 실시한다.
 - 가) 시험용기관의 아래쪽으로 Cu Lead선이 3mm 돌출하도록 고정
 - 나) Soldering전 시편(시험용기관+Cu Lead선)의 무게를 측정(W1)
 - 다) Soldering후 시편(시험용기관+Cu Lead선+Solder)의 무게를 측정(W2)
- 3) 시편에 납땜된 Solder의 무게를 측정한다(W2-W1)
- 4) 산출된 Solder량의 기준치(약 0.02g±0.001)인 시편 5개를 시료로 한다.
- 5) Cu Lead선에 1kg의 추를 매단다. (시험용 기관으로부터 추까지의 거리는 5cm가 되도록 한다.)
- 6) 시편에 Timer를 연결하여 시편 설치용 Die에 고정된 다음 130℃로 Setting된 항온기에 넣고 Timer가 Zero상태에서 Test를 실시한다.
- 7) 시험이 완료(Cu Lead선이 시험용 기관의 납땜부위를 이탈한 시점)되면 시편의 상태를 관찰하여 시험의 이상유무를 검사한다.
- 8) 5개 시편의 평균시간을 Creep수명으로 판정한다.

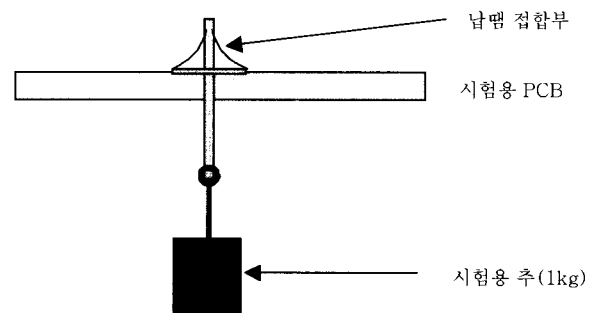


Fig. 3 Creep test

(측정된 Creep수명이 이상적으로 값이 벗어나는 경우는 납땜불량 등에 관계될 수 있으므로 평균치에서 제외한다.)

2.5 온도 Cycle 시험

열 응력 스트레스에 의한 납땜부의 Crack 발생 여부를 파악하기 위함이다.

- 1) 납땜장치를 사용하여 시험용 기판에 Connector를 Soldering 한다.
 - 가) Soldering전 시편(시험용 기판+connector)의 무게를 측정(w1)
 - 나) Soldering후 시편(시험용 기판+Connector+Solder)의 무게를 측정(w2)
- 2) 시편에 납땜된 Solder의 무게를 측정한다(w2-w1)
- 3) Solder량이 측정된 기판 10매를 시료로 한다.(초기, 시험 Cycle별 10매)
- 4) 시편을 조건이 Setting된 시험기에 투입하여 시험을 실시한다.

3. 실험 결과

3.1 성분별 용점 비교

용점은 Solder가 녹는점으로서 Wave Soldering 이

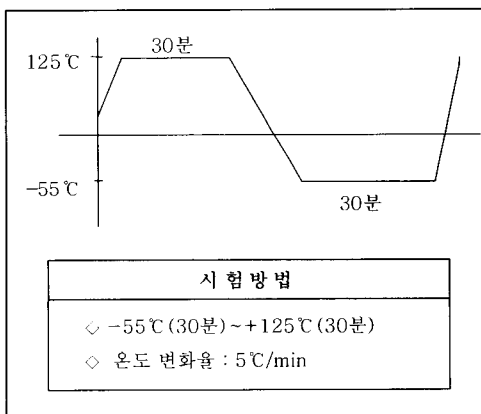


Fig. 4 Temperature cycle test condition

Table 3 Melting temperature comparison

	구성 성분	고상선(°C)	액상선(°C)
공정 Solder	Sn63/Pb37	183	183
A(Sn-Ag-Cu계)	Sn96.5/Ag3/Cu0.5	217	220
B(Sn-Ag-Cu-Bi계)	Sn90/Ag2/Cu0.5/Bi7.5	189	213
C(Sn-Ag-Cu-Sb계)	Sn96.2/Ag2.5/Cu0.8/Sb0.5	217	226

나 Reflow Soldering에서 매우 중요한 특성이라고 할 수 있다. 용점이 너무 높으면 부품에 열 충격을 주어 파괴시킬 우려가 있으며, 반대로 너무 낮은 것도 환경 변화에 민감하므로 신뢰성이 좋지 않다. 유력 후보들 중 상당수가 기존 공정 Solder에 비해 높은 용점을 가지고 있으므로 제조 현장에서는 설비의 온도를 높이 올려야 하고, 부품 Maker는 부품의 내열성을 높이지 않으면 안되게 되었다. 용점 측정기를 이용하여 유력 후보들의 용점을 측정해본 결과 기존의 공정 Solder와 가장 가까운 용점을 갖고 있는 Sn-Ag-Cu-Bi계가 가장 유리한 것으로 나타났다.

3.2 접합 강도 평가

접합 강도를 측정 해 본 결과 Sn-Ag-Cu-Sb계를 제외하면 선정된 Pb-free Solder는 기존의 공정 Solder에 비해 높은 초기 접합 강도를 나타내었다. 그 중에서도 Sn-Ag-Cu-Bi계의 Pb-free Solder는 기존의 공정 Solder에 비해 약 두 배 정도의 접합강도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그 이유는 Bi가 함유되어 있는 Solder에서는 젖음력(Wetting Force)가 향상되므로 납량이 많아져서 높은 접합 강도를 기록한 것으로 판단된다. 그러나 표준 편차가 매우 큰 것을 보면 동박 및 Lead에 부착 되는 납량의 편차도 크다는 것을 알 수 있다. 반면에 Sn-Ag-Cu계 Solder는 공정 Solder 보다 높은 접합 강도를 나타내면서 표준 편차도 크지 않음을 알 수 있다. Sn-Ag-Cu-Sb계 Solder는 접합 강도는 좋지 않으면서 표준 편차도 크게 나타났다.

3.3 젖음성 평가

동판 젖음성 평가에서는 Sn-Ag-Cu-Bi계 Solder가 공정 Solder에 거의 근접하는 좋은 결과를 얻었고 Sn-Ag-Cu-Sb계는 젖음 속도는 조금 느리지만 젖음력 자체는 크게 떨어지지 않는 수준으로 나타났다.

리드의 젖음성 평가에서는 Sn-Ag-Cu계가 기존의 공정 Solder 보다도 더 좋은 결과를 보이고 있는 것은

Table 4 Initial joint strength (단위:kgf)

	평균	MIN	MAX	표준편차
공정 Solder	6.3	4.6	9.6	0.9
A(Sn-Ag-Cu계)	6.8	4.9	8.8	1.0
B(Sn-Ag-Cu-Bi계)	11.3	7.2	16.2	2.3
C(Sn-Ag-Cu-Sb계)	5.9	4.3	10.2	1.4

Table 5 Copper plate wettability

	Zero-cross time(t)	젖음력 T ₃ (mN)
공정 Solder	0.22 초	4.55
A(Sn-Ag-Cu계)	0.31 초	3.68
B(Sn-Ag-Cu-Bi계)	0.28 초	3.75
C(Sn-Ag-Cu-Sb계)	0.69 초	3.8

Table 6 Lead wettability

	Zero-cross Time(t)	젖음력 T ₃ (mN)
공정 Solder	0.48 초	0.596
A(Sn-Ag-Cu계)	0.24 초	0.597
B(Sn-Ag-Cu-Bi계)	0.4 초	0.547
C(Sn-Ag-Cu-Sb계)	0.48 초	0.592

리드의 도금 성분이 주석(Sn)이기 때문으로 판단된다.

3.4 퍼짐성 평가

아래의 결과표를 보면 기존의 공정 Solder에 비해 Sn-Ag-Cu-Bi계의 Solder가 퍼짐율이 근사할 만큼 우수하다. 일반적으로 퍼짐율이 80%를 넘으면 우수한 것으로 평가하므로 Sn-Ag-Cu-Sb계를 제외하면 공정에서 사용 가능한 수준이라고 할 수 있다.

3.5 Creep 시험(130°C에서 1kg)

모든 Pb-free Solder가 기존의 공정 Solder에 비해 월등히 좋은 결과를 보이고 있다. 지속적이고 일정한 Stress에 대해서는 Pb-free Solder가 잘 견딘다는 것을 알 수 있었다.

Table 7 Spreadability test results

	비중 (g/cm ³)	무게(g)	H(mm)	D(mm)	퍼짐율 (%)
공정 Solder	8.50	0.302	0.525	4.075	87
A(Sn-Ag-Cu계)	7.50	0.302	0.830	4.248	81
B(Sn-Ag-Cu-Bi계)	7.50	0.304	0.655	4.261	85
C(Sn-Ag-Cu-Sb계)	7.24	0.302	1.223	4.301	72

Table 8 Creep test results

공정 Solder	A(Sn-Ag-Cu계)	B(Sn-Ag-Cu-Bi계)	C(Sn-Ag-Cu-Sb계)
1.35 HR	135 HR	74 HR	94 HR

3.6 온도 Cycle 시험

1) 온도 Cycle 200회 실시 후 접합강도 측정

공정 Solder를 제외한 모든 Pb-free Solder에서 Crack은 발생되지 않았으나, Sn-Ag-Cu-Bi계 Solder에서 초기에 발생한 Lift-off가 더욱 심하게 진행된 것을 알 수 있었다.

접합 강도는 대체로 약간 떨어진 경향을 보였으나 심각한 수준은 아닌 것으로 판단된다.

2) 온도 Cycle 500회 실시 후 접합강도 및 Crack 발생수

온도 Cycle 500회 실시 후에는 접합강도가 많이 떨어졌으며, 모든 Solder에서 Crack이 발견되었다. Sn-Ag-Cu계 Solder는 Crack의 발생은 있으나 진행 정도가 약해서 표에서 알 수 있듯이 접합강도가 어느 정도 유지되고 있었다.

4. 결 론

Pb-free Solder로서 적용이 유력시되는 것을 선정하여 여러 가지 항목에 걸쳐 시험을 해 본 결과 Sn-Ag-Cu-Bi계가 대체적으로 좋은 결과를 얻었지만 PCB상의 Solder Land와 Solder가 분리되는 Lift-off 현상이 발견됨으로 인해 사용이 불가능하다.

대체로 Sn-Ag-Cu의 3원계 Solder가 가격 및 작업성, 신뢰성에서 양호한 결과를 나타내므로 공정 Solder를 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 이번 평가에서는 제외되었지만 지금까지 개발된 Pb-free Solder는 무수

Table 9 Joint strength after 200 cycle (단위:Kgf)

	평균	MIN	MAX	Crack 수
공정 Solder	5.4	4.1	7.4	1
A(Sn-Ag-Cu계)	5.7	3.9	8.7	0
B(Sn-Ag-Cu-Bi계)	11.2	8.1	15.3	0
C(Sn-Ag-Cu-Sb계)	5.2	2.8	7.7	0

Table 10 Joint strength after 500 cycle

	평균	MIN	MAX	Crack 수
공정 SOLDER	4.8	0	7.3	7 Points
A(Sn-Ag-Cu계)	5.6	2.8	8.2	2 Points
B(Sn-Ag-Cu-Bi계)	11.4	0	17.4	3 Points
C(Sn-Ag-Cu-Sb계)	4.6	0	6.8	4 Points

Table 11 Total arrangement of test results

	Pb-free Solder 품질 특성 평가 결과			
	공정 Solder	Sn-Ag-Cu계	Sn-Ag-Cu-Bi 계	Sn-Ag-Cu-Sb 계
용점(액상선)	183℃	220℃	213℃	226℃
초기 접합강도	6.3kgf	6.8kgf	11.3kgf	5.9kgf
동판 젖음성 (Zero cross time /T ₃ (mN))	0.22 초	0.31 초	0.28 초	0.69 초
	4.55mN	3.68mN	3.75mN	3.8mN
Sn 리드 젖음성 (Zero cross time /T ₃ (mN))	0.48 초	0.24 초	0.4 초	0.48 초
	0.596mN	0.597mN	0.547mN	0.592mN
퍼짐성	87%	81%	85%	72%
Creep test	1.35 HR	135 HR	74 HR	94 HR
온도사이클 200후 접합강도	5.4kgf	5.7kgf	11.2kgf	5.2kgf
온도사이클 500후 Crack 발생수	7 Points	2 Point	3 Points	4 Points
Lift-off 발생	無	無	有	無

히 많다. 특히 저용점 Solder로서 개발되고 있는 Sn-Zn계 및 Sn-Zn-Bi계 Solder를 주목할 필요가 있다. 이 계열의 합금은 용융 온도를 기존의 공정 Solder에 거의 근접하게 할 수 있으므로 기존의 설비 및 부품 내열성, 공정 조건등을 그대로 유지할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

또한 가격도 다른 Pb-free Solder에 비해서 싸다는 장점을 가지고 있다. 다만 젖음성이 좋지 않고, Reflow 내부에서 산화가 심하고 상온에서도 장시간 보관할 수 없다는 결점이 있기 때문에 지금 당장 적용하기는 어려울 것으로 판단된다. 그러나 향후에 이러한 결점들을 상당부분 개선한 Flux가 개발된다고 하면 적용 시기가 앞당겨 지리라 생각된다.



- 김우영(金祐永)
- 1964년생
- (주)SMT KOREA 부설연구소
- SMT Process
- e-mail: kwy1094@smtkorea.co.kr



- 노보인(盧寶仁)
- 1976년생
- (주)SMT KOREA 부설연구소
- SMT Process
- e-mail: pslife@smtkorea.co.kr



- 김인철(金仁哲)
- 1969년생
- (주)SMT KOREA 부설연구소
- SMT Process
- e-mail: inchkim@unitel.co.kr