

## Sn-Ag-Cu-X 무연솔더로 솔더링 된 접합부의 진동파괴 거동

진상훈\* · 강남현\*† · 조경목\* · 이창우\*\* · 홍원식\*\*\*

\*부산대학교 공과대학 재료공학과

\*\*한국생산기술연구원 용접접합기술센터

\*\*\*전자부품연구원 신뢰성물리연구센터

### Behavior of Vibration Fracture for Sn-Ag-Cu-X Solders by Soldering

Sanghun Jin\*, Namhyun Kang\*†, Kyung-mox Cho\*, Changwoo Lee\*\* and Wonsik Hong\*\*\*

\*Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

\*\*\*Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 463-816, Korea

†Corresponding author : nhkang@pusan.ac.kr

(Received April 13, 2012 ; Revised April 24, 2012 ; Accepted April 25, 2012)

#### Abstract

Environmental and health concerns over the lead have led to investigation of the alternative Pb-free solders to replace commonly used Pb-Sn solders in microelectronic packaging application. The leading candidates for lead-free solder alloys are presently the near eutectic Sn-Ag-Cu alloys. Therefore, extensive studies on reliability related with the composition have been reported. However, the insufficient drop property of the near eutectic Sn-Ag-Cu alloys has demanded solder compositions of low Ag content. In addition, the solder interconnections in automobile applications like a smart box require significantly improved vibration resistance. Therefore, this study investigated the effect of alloying elements (Ag, Bi, In) on the vibration fatigue strength. The vibration fatigue was conducted in 10~1000Hz frequency and 20Grms. The interface of the as-soldered cross section close to the Cu pad indicated the intermetallic compound ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) regardless of solder composition. The type and thickness of IMC was not significantly changed after the vibration test. It indicates that no thermal activities occurred significantly during vibration. Furthermore, as a function of alloying composition, the vibration crack path was investigated with a focus on the IMCs. Vibration crack was initiated from the fillet surface of the heel for QFP parts and from the plating layer of chip parts. Regardless of the solder composition, the crack during a vibration test was propagated as same as that during a thermal fatigue test.

Key Words : Vibration, Fatigue, Fracture, Intermetallic compound, Pb-free solder

#### 1. 서 론

지난 수년 동안 주요 전자 제조업체들의 대표 무연솔더 조성으로서 다양한 전자제품의 제작에 적용되어 온 Sn-3.0Ag-0.5Cu(SAC305) 합금은 그 신뢰성도 충분히 검증된 바 있다<sup>1-3)</sup>. 그러나 최근 Ag 가격의 급격한 상승과 전자산업의 저가격화 전략으로 인해 솔더 재료

에서의 Ag의 함량의 감소가 지속적으로 요구되는 것이 현실이다. 또한 많은 전자제품이 휴대화되면서 전자제품의 내충격 신뢰성이 점차 중요하게 인식되는 현 상황에서, 기존 Sn-Pb 합금에 비하여 경도가 높은 SAC 3원계 솔더 접합부의 경우 일반적으로 내충격 신뢰성이 저하되는 것으로 보고되고 있다. SAC 합금에서 Ag의 함량을 감소시키면 내충격 신뢰성이 향상되는 결과들이 발표되면서, 더욱 SAC계 무연솔더 조성에서 Ag의 함

량의 감소와 함께 기계적 성질을 향상시킬 수 있는 신소재 개발에 대한 요구가 계속 증가하고 있다.

SAC 3원계 합금에서 Ag는 합금의 용점을 낮추면서 강도 등 기계적 특성을 증가시키고, 또한 모재와 합금의 젖음성을 향상시키는데 필수적인 원소이다<sup>4)</sup>. 따라서 SAC 3원계 합금에서 Ag 함량에 따른 기계적 특성의 차이를 비교하기 위하여 SAC305 대비 Ag 함량을 낮춘 Sn-1.0Ag-0.5Cu(SAC105) 합금을 선정하였다. 또한 Ag의 첨가량을 최적화하면서 제 4 원소의 영향을 연구하기 위하여, 본 연구는 Sn-Ag-Cu계에 In과 Bi를 선택하여 미세조직 특성, 접합부의 기계적 강도 및 접합부의 진동피로 신뢰성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법 및 재료

### 2.1 시편 제작

사용된 PCB는 1.4mm 두께의 FR-4 재질을 사용하였으며, PCB 패드는 30 $\mu$ m 두께의 Cu 전기도금 후 OSP(organic solderability preservative)처리를 하였다. 사용된 솔더는 In과 Bi를 첨가한 Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.05Bi(SACX0307)와 Sn-1.2Ag-0.7Cu-0.4In(SACS1207), 그리고 Ag 함량에 따른 Sn-1.0Ag-0.5Cu(SAC105)와 Sn-3.0Ag-0.5Cu(SAC305) 3원계 합금 무연솔더를 사용하였다. 표면실장 공정에서 피크온도는 242°C, 예열구간은 150~180°C에서 90~150초 유지하였고, 레일속도는 700mm/min이었다. 그림 1은 2012 저항칩(chip resistor)과 QFP44 pin을 사용하여 제작한 실험용 쿠폰 사진이다.

### 2.2 진동 시험

상기의 과정을 통해 제작된 모듈은 가속도 20Grms, 주파수 10~1000Hz에서 20시간 동안 시험하였으며, 저항측정기를 이용하여 실시간 저항값을 측정하였다. 그림 2는 실제 진동시험기와 시편을 장착한 지그를 나

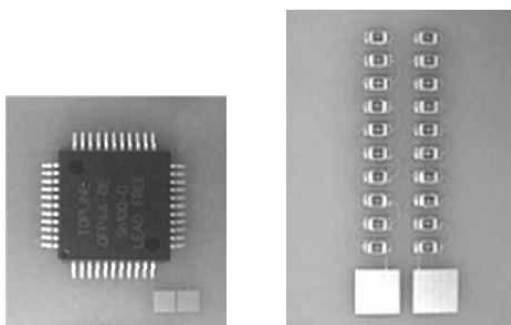


Fig. 1 Test PCBs mounted with QFP44 pin and 2012 Chip resistor for vibration test

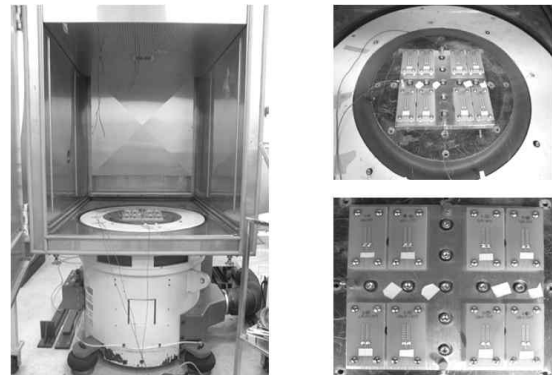


Fig. 2 Vibration test layout on the vibrator

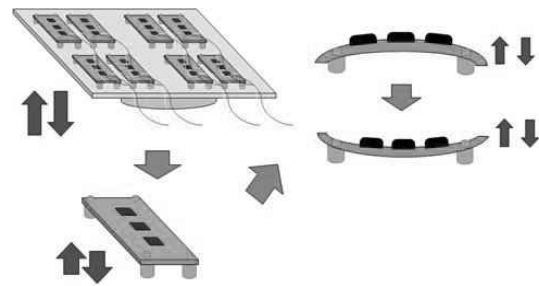


Fig. 3 Schematic image to explain warpage effects during vibration test

타낸다. 그림 3은 진동시험에 의한 PCB의 뒤틀림(warpage) 효과를 묘사한 것이다. 뒤틀림 현상은 기관의 두께가 점점 얇아지면서 기관의 내측면 방향으로 휘는 현상으로서, 진동시험 시 실장부품 등에 균열을 발생시키는 신뢰성 문제를 일으킬 수 있다. 본 실험은 뒤틀림 현상을 최소화하고 솔더벌 특성을 연구하기 위하여 테스트 PCB의 크기를 최소화하였다.

### 2.3 접합 강도 및 계면분석

제작된 시편은 실체현미경을 사용하여 솔더 접합부 외관검사를 하였다. 솔더링 된 상태는 4종의 무연솔더 모두 동박 노출 없이 적절한 접합부 필렛(fillet)을 형성하였다. 또한 X선 비파괴검사기를 사용하여 접합부의 기공(void) 분율을 측정하였고, 솔더 접합부는 7% 이내의 기공을 가진 매우 양호한 접합상태를 가지고 있었다.

진동시험에 따른 접합강도를 평가하기 위해 DAGE 4000 본딩시험기를 이용하였다. 칩부품에 대한 전단시험은 시험속도 167 $\mu$ m/sec, 그리고 전단지그 높이는 PCB 표면으로부터 50 $\mu$ m 위치에서 측정하였다. 전단강도값은 각 부품별 10개 실험값의 평균값을 사용하였다. QFP의 경우 기관과 45°의 방향으로 접합된 리드를 당겨서 시험하였다<sup>5)</sup>.

또한 전단강도에 영향을 미치는 금속간화합물(IMC)

의 분석을 위해 솔더 접합부 단면을 정밀 연마한 후, 95CH<sub>3</sub>OH/4HNO<sub>3</sub>/1HCl의 용액으로 에칭하여 광학현미경과 주사전자현미경 그리고 EDS (energy dispersive spectroscopy)를 사용하여 진동피로 균열부와 접합부 계면에 형성된 금속간화합물의 두께와 종류를 분석하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 진동 전-후 접합강도 비교

그림 4는 20Grms 진동시험 전과 후의 접합강도 값을 비교하였다. As-reflow 후 진동시험 전 QFP의 접합강도는 SAC105와 In이 첨가된 SACX1207 접합부가 SAC305와 Bi가 포함된 SACX0307보다 높게 측정되었으며 진동시험 후 접합강도의 감소 비율은 SAC305와 SACX0307 솔더 접합부가 적은 것으로 확인되었다. 그러나 측정오차를 고려하면 SAC105와 SACX1207의 초기 강도가 월등히 높은 것은 아니며, 진동시험 후 강도도 솔더의 종류에 따라 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 칩부품의 경우도 진동시험 전 접합강도는 SACX0307이 조금 낮고 나머지 솔더들의 접합강도가 비슷한 것을 확인할 수 있었는데, 이 또한 평균 강도값에 대한 측정오차를 고려하면 솔더 종류에 따라 접합강도는 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.

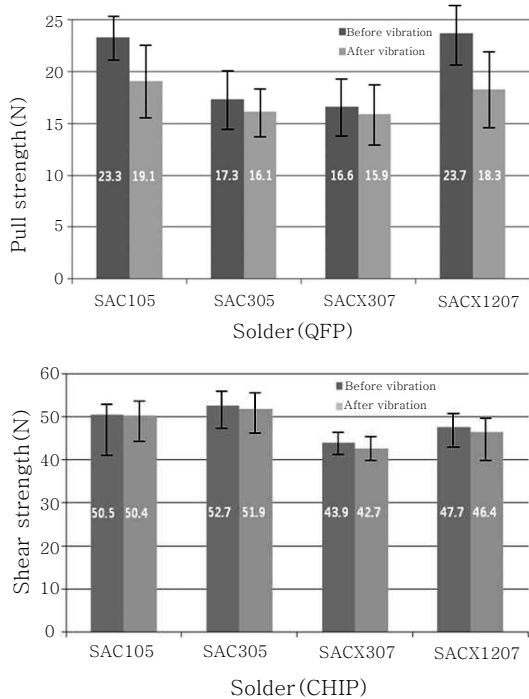


Fig. 4 Bonding strength before/after vibration test for QFP and chip parts

#### 3.2 솔더 접합부 진동피로 균열 전파 경로

광학현미경을 이용하여 진동시험 전 QFP와 칩 접합부의 단면을 관찰하였다. 그림 5와 6에서 볼 수 있듯이 4종류 솔더 모두 균열은 없었으나 기공이 발견되었다. 그러나 접합강도에 영향을 줄 정도의 큰 기공은 발견되지 않았고 강건한 접합부를 형성하였다.

진동시험 후 단면을 광학현미경을 이용하여 관찰해 본 결과, 균열의 생성과 진전에 대한 경향성이 발견되었다. 그림 7은 QFP 부품에서 발생한 크랙의 전파경로를 설명하는 그림이다. 솔더 필렛의 안쪽 힐(heel)부분 A와 리드(lead)의 아래쪽 힐(heel)부분 B에서 가장 빈번하게 발생하고, 그리고 바깥쪽 힐(heel)부분 C의 솔더 바깥 표면에서 균열이 발생하였다. 힐(heel)에 위치한 균열 A는 점차 솔더 내부로 침투하면서, 리드부를 통과하지 못하고 리드부와의 경계면에서 성장한 금속간화합물층을 따라 전파되었다.

그림 8은 리드와 솔더의 경계에 있는 금속간화합물층

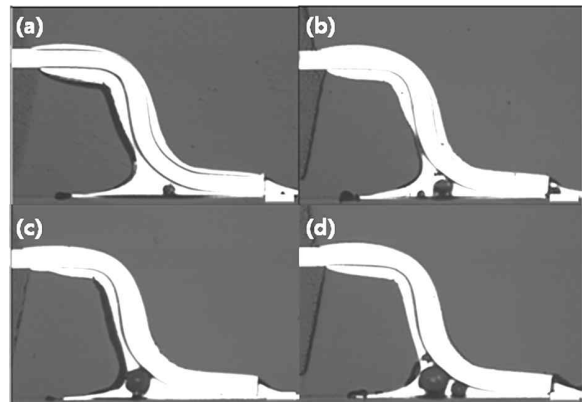


Fig. 5 Cross-section of the QFP soldered joints before vibration: (a) SAC105, (b) SAC305, (c) SACX0307 and (d) SACX1207

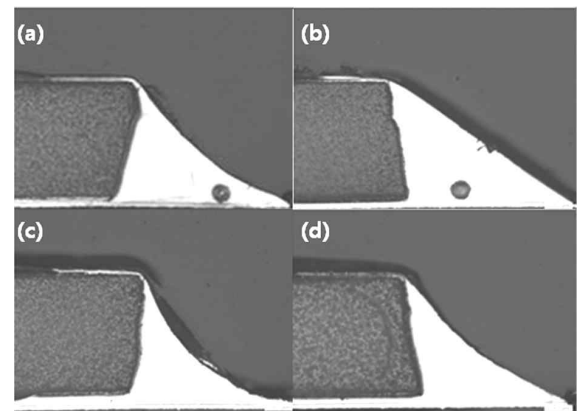


Fig. 6 Cross-section of the chip soldered joints before vibration: (a) SAC105, (b) SAC305, (c) SACX0307 and (d) SACX1207

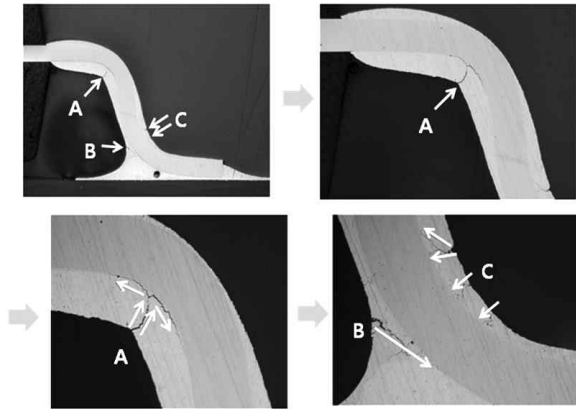


Fig. 7 Initiation and growth of vibration crack for QFP

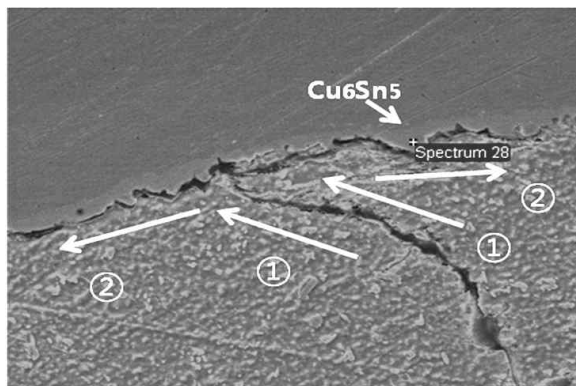


Fig. 8 Crack propagation of A point indicated in Fig. 7

Table 1 IMC composition of spectrum 28 indicated in Fig. 8

Element	Weight(%)	Atomic(%)
Cu L	33.97	49.00
Sn L	66.03	51.00
Totals	100.00	

을 따라 균열이 전파되는 것을 보여주는 주사전자현미경 사진이다. 표 1은 그림 8의 spectrum 28 위치에서 측정된 EDS 결과이다. EDS의 정량적 평가 신뢰성을 고려하면 spectrum 28 위치의 조직은  $Cu_6Sn_5$ 로 판단된다<sup>(6,7)</sup>. 이 결과를 통해서 금속간화합물층이 리드 또는 솔더 내부보다 진동피로에 약하다고 판단된다. 그리고 B(heel부분)와 C의 경우도 A에서 진전하는 균열과 마찬가지로, 초기 균열은 솔더 접합부 필렛의 힐(heel) 부근에서 시작하여 솔더 계면으로 균열이 진전된다.(그림 7) 이 결과는 열 피로에 관한 기존의 연구<sup>(8)</sup>에서와 같이, QFP에서 진동 시 최대응력과 변형은 먼저 솔더 필렛의 힐(heel)부분에 집중되고, 그 다음에 리드의 토

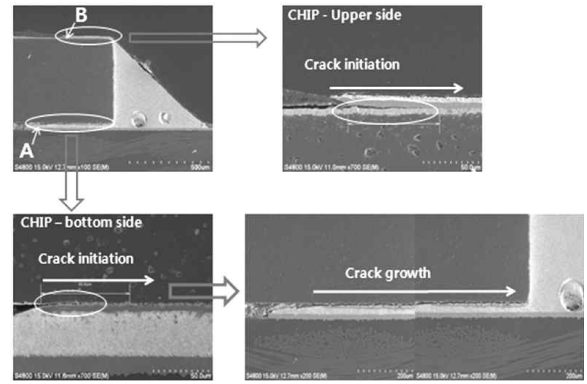


Fig. 9 Initiation and growth of vibration crack for chip

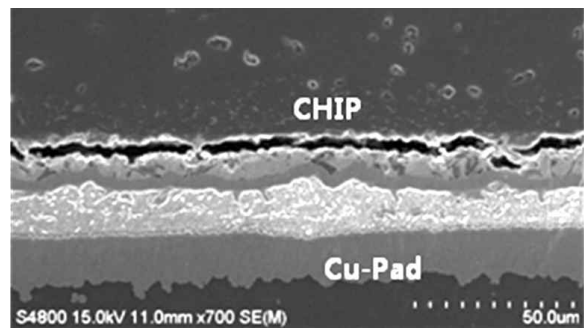


Fig. 10 Crack propagation of A point indicated in Fig. 10

우(toe)부분에 집중 응력이 발생했기 때문에 판단된다. QFP 부품에서의 진동피로 균열의 시작과 전파 메커니즘은 열 피로 균열의 메커니즘과 유사하였다<sup>(9,10)</sup>.

칩 접합부의 경우 역시 4종류 솔더 모두 그림 9와 같은 균열 거동이 관찰되었다. 균열은 칩과 솔더가 만나는 A부분에서 가장 먼저 시작되었다. 균열 전파 경로는 솔더와 칩 도금층이 만나는 지점에서 발생하여 칩의 바깥테두리를 따라 솔더 접합부의 필렛 방향으로 전파되었다. 그림 10은 도금층에서 균열이 전파하는 것을 보여주는 확대 사진이다. 칩 아랫부분인 A지점에서 먼저 크랙이 발생하였으며, 그 후 위쪽 도금부 B지점에서도 균열이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 열 피로에 관한 연구 결과<sup>(9,10)</sup>에서와 같이, 솔더 접합부의 형상 때문에 계면 근처 A지점에서 응력집중이 먼저 발생하고, 더불어 금속 원자의 확산에 의해 계면 근처가 경화되기 쉽기 때문이다. QFP 부품에서와 같이 칩 부품에서의 진동피로 균열의 시작과 전파 메커니즘도 열 피로 균열의 메커니즘과 유사하였다.

Table 2 Thickness of IMCs

	SAC105	SAC305	SACX0307	SACX1207

Before vibration	3.6 $\mu\text{m}$	4.1 $\mu\text{m}$	3.9 $\mu\text{m}$	3.5 $\mu\text{m}$
After vibration	3.9 $\mu\text{m}$	4.4 $\mu\text{m}$	4.3 $\mu\text{m}$	3.8 $\mu\text{m}$

마지막으로 진동 전과 후의 금속간화합물층의 두께를 측정하여 진동시험으로 인한 금속간화합물의 성장을 확인해 보았다. 표 2의 결과에서도 볼 수 있듯이 진동 전과 후의 금속간화합물 성장은 10% 이내로 조금 증가하는 것으로 나타났다. 비록 진동시험 중 직접적인 열적 구동력은 가하지 않았지만, 진동 메커니즘 동안 기계적으로 여기된 열적 구동력(mechanically activated thermal driving force)이 작용한 것으로 판단된다. 그러나 10% 이내의 금속간화합물층 두께 증가는 접합강도에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 이에 대한 정확한 메커니즘은 추후 연구가 더 필요할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 Sn-Ag-Cu-X 무연 솔더의 조성에 서 Ag, Cu, Bi 그리고 In 함량에 따른 진동과피 신뢰성을 분석하였다. 총 4종류의 무연솔더 SAC105, SAC305, SACX0307(Bi 포함), SACX1207(In 포함)을 사용하여 가속도 20Grms에서 진동시험을 진행하였고, 그 결과 실장부품별 그리고 솔더별 진동시험의 영향을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

1) QFP의 경우 진동시험 전의 접합강도는 SAC105와 In이 첨가된 SACX1207가 SAC305와 Bi가 포함된 SACX0307보다 높게 나왔다. 진동시험 전과 후의 접합강도 변화는 SAC305와 SACX0307에서 차이가 적었다.

2) 칩의 경우 진동시험 전의 접합강도는 솔더의 종류에 따라 큰 차이가 없었다. 진동 전과 후의 접합강도는 모든 솔더에서 큰 차이가 없었다.

3) QFP에서 발생한 균열의 경우 리드의 꺾어지는 힐(heel)부분인 S자 곡선부분의 솔더 바깥표면에서 발생하여 솔더 내부로 침투한 뒤, 균열이 리드부를 통과하지 못하고 리드부에서 성장한 금속간화합물층을 따라 전파되었다. 따라서 금속간화합물층이 리드부 또는 솔더 내부보다 진동피로에 약한 것으로 사료된다. 이는 열 피로 균열의 메커니즘과 유사하게, 진동 시 최대응력과 변형은 먼저 솔더 필렛의 힐(heel)부분에 집중되고, 나중에 리드의 토우(toe)부분에 집중응력이 발생한 것이다.

4) 칩의 경우 역시 4종류 솔더 모두 칩과 솔더가 만나는 부분의 칩 도금층을 따라 균열이 발생하고 전파되었다. 칩 아랫부분에서 먼저 균열이 발생하였으며, 그

후 위쪽 도금층에서도 균열이 발생하였다. 이는 열 피로 균열의 메커니즘과 유사하게 솔더 접합부의 형상 때문에 칩의 아래쪽 계면 근처에서 응력집중이 먼저 발생하고, 더불어 금속 원자의 확산에 의해 계면 근처가 경화되었기 때문이다.

#### 후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Abtew, G. Selvaduray : Materials Science and Engineering, 27 (2000), 95-108
2. D. Suraski and K. Seeling : IEEE Transactions EPM, 24 (2001), 244-248
3. J. K. Lin, A. D. Silva, D. Frear, Y. Suo, S. Hayes, J. W. Jang, L. Li, D. Mitchell, B. Yeung and C. Zhang : IEEE Transactions EPM, 25 (2002), 300-307
4. A-Mi Yu, Chang-Woo Lee, Jeong-Han Kim and Mok-Soon Kim, Jong-Hyun Lee : Impact Resistance Reliability of Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.4In Solder Joints, Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Materials Engineers, 9 (2008), 226
5. Jae Sik Lee, Jae Phil Jung and Sook Hwan Kim : Evaluation of Metallurgical Characteristics and Strength on Soldered Joint, Journal of KWJS, 20-4 (2002), 437-442 (in Korean)
6. Won-Sik Hong, Whee-sung Kim, Noh-Chang Park and Kwang-Bae Kim : Activation Energy for Intermetallic Compound Formation of Sn-40Pb/Cu and Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu Solder Joints, Journal of KWJS, 25-2 (2007), 184-190 (in Korean)
7. Chang-Bae Lee, Chang-Youl Lee, Chang-Chae Shur and Seung-Boo Jung : The Growth Kinetics of Intermetallic Compound Layer in Lead Free Solder Joints, Journal of KWS, 20-3 (2002), 272-279 (in Korean)
8. K.S. Kim and Y.E. Shin : A Study on the Thermal Fatigue of Solder Joint by Package Type, Journal of KWS, 17-6 (1999), 433 (in Korean)
9. Jin-Ki Kim and Soon-Bsok Lee : A Study on the Fatigue Life Prediction of Solder Joints under Thermal Cyclic Loading, Journal of the Korea institute of telematics and electronics, A, 1994, 1660-1671
10. Ilho Kim, Tae-sang Park and Soon-Bok Lee : A Comparative Study of the Fatigue Behavior of SnAgCu and SnPb Solder Joints, Transactions of the Korean Society of mechanical engineers. A, 2004, 1856-1863 (in Korean)