

고신뢰성 광모듈을 위한 솔더 범프의 전단강도와 시효 특성

유 정 희*

*한국전자통신연구원 광통신부품연구센터

Shear Strength and Aging Characteristics in Solder Bumps for High Reliability Optical Module

*Chong-Hee Yu

*Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-350, Korea

Abstract

The change of microstructures in the base metal during transient liquid phase bonding process of directionally Ni base superalloy, GTD-111 was investigated. Bonds were fabricated using a series of holding times(0~7.2ks) at three different temperatures. The flip chip bonding utilizing self-aligning characteristic of solder becomes mandatory to meet tolerances for the optical device. In this paper, a parametric study of aging condition and pad size of samples was evaluated. A TiW/Cu/electroplated Cu UBM structure was selected and the samples were aging treated to analyze the effect of intermetallic compounds with the time variations. An FIB technique was applied to the preparation of samples for TEM observations. An FIB technique is very useful to prepare TEM thin foil specimens from the solder joint interface. After aging treatment, the tendency to decrease in shear strength was measured and the structure of the solder and the UBM was observed by using SEM, TEM and EDS. As a result, the shear strength was decreased of about 21% in the 100 μm sample at 170 $^{\circ}\text{C}$ aging compared with the maximum shear strength of the sample with the same pad size. In the case of the 120 $^{\circ}\text{C}$ aging treatment, 18% of decrease in shear strength was measured at the 100 μm pad size sample. An intermetallic compound of Cu₆Sn₅ and Cu₃Sn were also observed through the TEM measurement by using

(Received February 14, 2003)

Key Words : Solder bump, Shear strength, Aging, Intermetallic compound, Transmission electron micrograph

1. 서 론

광통신 모듈에 있어서는 광통신의 주파수 대역이 밀리미터 파로 발전함에 따라 신호의 왜곡이나 지연(delay)을 최소화하여 전기적인 성능을 향상시키기 위해, 범용 패키지의 와이어 본딩(wire bonding)에 의한 전기적인 연결과는 달리, 플립칩 본딩(flip chip bonding) 기술이 이용되고 있다. 플립칩 본딩은 와이어 본딩 방식보다 짧은 접속 길이로 전기적인 성능의 향상을 가져 올 수 있다¹⁾. 특히 고주파의 특성을 충분히 살리기 위하여 Au-Sn을 이용한 열 압착 방식의 플립칩 본딩 기술에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나, 광 신호 전송의 효율적인 측면에서는 광 신호의 정렬이 결정적으로 중요

한 항목이므로 열 압착 방식은 한계에 직면하고 있다. 따라서 자발 정렬(self-aligning)이 가능한 솔더 리플로우 방식의 플립칩 본딩 기술에 대한 연구가 필요한 실정이다. 이러한 기술은 미세 패드 피치의 범핑 기술을 사용하는데 솔더접합부의 장기신뢰성에 대한 문제점이 해결해야 할 과제로 남아있다²⁻⁷⁾. 본 연구에서는 광소자의 모듈화 및 고속화에 따라 포토 다이오드의 패드 크기가 지름 80 μm 와 100 μm 인 표면에 Au 스퍼트 범프를 형성하였다. 또한 두 종류의 솔더 범프를 형성시켜 범프와 TiW/Cu/ electroplated Cu UBM (Under Bump Metallurgy)의 접합강도와 등은 시효처리에 따른 강도 변화를 전단실험을 통해 측정하였고, 금속간화합물(Intermetallic Compound, IMC)의 성장 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 칩은 초고속(10Gbps급) 포토 다이오드이며, Fig. 1에 양극(anode)과 음극(cathode), 그리고 균형을 유지하기 위한 더미(dummy) 범프구조를 나타내었다. 칩의 크기는 $460 \times 250 \mu\text{m}$ 이고, 두께는 $100 \mu\text{m}$ 이다. 본딩 패드의 크기는 지름이 $80 \mu\text{m}$ 와 $100 \mu\text{m}$ 이며, 광소자 재료로는 InP를 사용하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 상단에 설계된 사각 형상은 얼라인 마크(align mark)로 패턴 작업시 정확한 정렬을 도모하였다. 구성된 두 가지의 구조에서 Au 스테드 범프는 와이어 본딩 기술을 이용하여 $2.0 \mu\text{m}$ 두께의 Al 패드 위에 Au 스테드 범프를 형성한 후 코이닝 과정을 통해 높이를 균일하게 형성하였다. 솔더 범프 공정 설계는 건식 산화막 $0.2 \mu\text{m}$ 위에 Al-1%Si/TiW(9:1)/Cu=1.0/0.2/0.4 μm 의 비율로 스퍼터 증착하였다. Fig. 2는 솔더 범프 형성에 대한 개괄적인 공정 순서를 나타내었다. Fig. 3은 $100 \mu\text{m}$ 패드에 형성된 솔더 범프와 스테드 범프의 형상을 나타내었다. 솔더와 젖음(wetting)이 잘되고 솔더로의 용융이나 IMC로부터 기지 금속의 완전한 소모를 막기 위해 상부에 $10 \mu\text{m}$ 두께의 Cu를 전기도금(electroplating)으로 제조하였다. 두께 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 의 후막 포토 레지스트(photo resist, PR)를 하드 베이킹하여 전기도금으로 솔더 범프를 형성한 후에 PR 스트립(strip) 및 UBM을 에칭하고, 리플로우 공정으로 솔더 범프를 형성하였다. 솔더 페이스트 도포 후 리플로우에 사용된 장비는 적외선·열풍 혼합방식으로 전체 리플로우 시간은 5분이고, 컨베이어 속도는 0.55m/min 이다. 최고 온도 설정은 $210 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 45초, 액상상태 유지 시간은 60초로 하였다. 솔더 표면의 산화막을 제거하고, 균일한 모양의 범프를 형성시키기 위해 WS609 수용성 플럭스를 사용하였다. Sn-37wt%Pb 공정 솔더로 형성

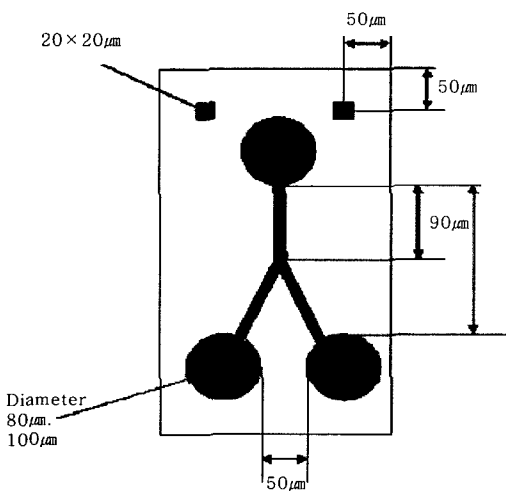


Fig. 1 Shape and size of photodiode

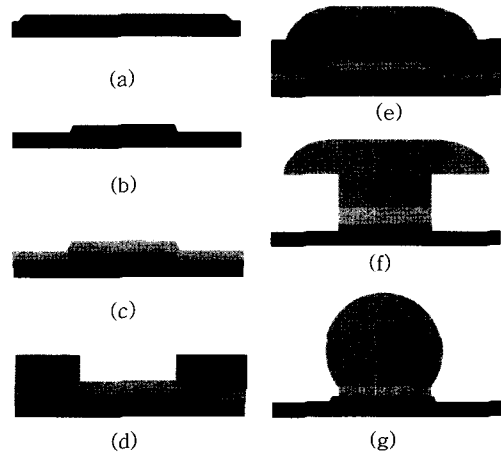


Fig. 2 The experimental procedure of the flip chip solder bumping on electro-plating (a) Al sputter deposition (b) Al patterning (c) UBM deposition (d) Thick PR coating (e) solder electroplating (f) PR strip and UBM etching (g) solder reflow

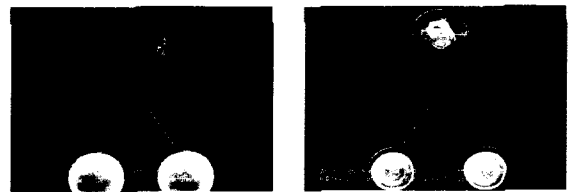


Fig. 3 Shape and size of solder bumps and Au stud bumps

한 범프는 패드 크기 $80 \mu\text{m}$ 와 $100 \mu\text{m}$ 에서, 범프의 직경은 각각 $95 \sim 99 \mu\text{m}$ 와 $120 \sim 135 \mu\text{m}$ 의 분포를 보였다. 또한 각 범프의 평균 높이는 $83 \mu\text{m}$ 와 $93 \mu\text{m}$ 이며 오차는 1%를 얻었다.

온도와 시간에 따른 IMC의 성장 변화를 분석하기 위해 등은 시효온도는 120°C , 170°C 두 종류로 구분하였고 0, 300, 600, 900시간 동안 시효처리 한 후에 전단강도를 측정하였다. 전단강도 측정은 전단 시험장치로 system 552(ROYCE)를 사용하였으며, 팁(tip)의 이동속도는 0.30mm/s , 팁의 높이는 UBM 표면에서부터 $2.0 \mu\text{m}$ 로 하였다. 전단강도 값은 조건마다 10개의 시편에서 30개의 범프를 실험하였으며, 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 사용하였다. 시효처리한 시편의 단면을 연마하여 주사전자현미경(SEM)으로 IMC층을 관찰하였다. IMC 분석은 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)과 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 이용하여 수행하였다. TEM 시료는 시편에 W를 증착하고, Ga+ 이온을 source로 한 가속 전압 30keV FIB(Focused Ion Beam)를 사용하여 가공하였으며, 100pA 빔 전류를 갖는 Ga+ 이온 빔을 이

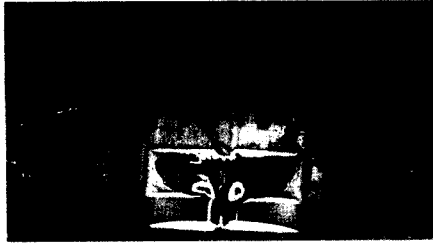


Fig. 4 FIB incision in solder and the UBM

용한 미세 밀링을 통하여 electron-transparency한 시료를 제조하였다. Fig. 4와 같은 두 개의 FIB 시료 가공은 Micrion 2100을 사용하였고, TEM은 HD-2000 (Hitachi)을 이용하여 가속전압 200keV에서 관찰하였다. 일반적으로 TEM 관찰용 시료는 시편을 절단하여 기계적인 연마후에 이온밀링(ion milling)에 의해 0.1 μm 이하의 두께로 만들어진다. 그러나, 이온 밀링에 의한 제조방법으로는 솔더 접합부의 IMC 부분이 매우 brittle하여 균일한 두께의 박막 시료를 만들기가 어렵다. 본 연구에서 적용한 FIB 기술은 이러한 단점을 보완하여 박막 시료의 제작이 가능하기 때문에 FIB 가공 기술은 미세 솔더 접합부의 TEM 관찰용 박막시료 제작에 유용한 기술임을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

패드 크기가 80 μm 와 100 μm 인 시편에 대해 시효 처리된 시편의 전단강도와 형성된 불 크기와의 관계를 관찰하였다. Fig. 5는 Sn-37wt%Pb의 솔더에 대해 시효 온도와 시간에 따른 전단강도 값의 변화를 나타내었다. 전단강도 값은 패드 크기와 무관하게 시효시간과 시효 온도의 증가에 따라 그 값이 감소하는 경향을 보였다. 시효온도 170 $^{\circ}\text{C}$ 에서 100 μm 패드 시편의 전단강도 값은 시효처리 이전의 756mN에서 900 시간 시효처리 후에는 그 값이 625mN으로 약 21% 정도가 감소하였다.

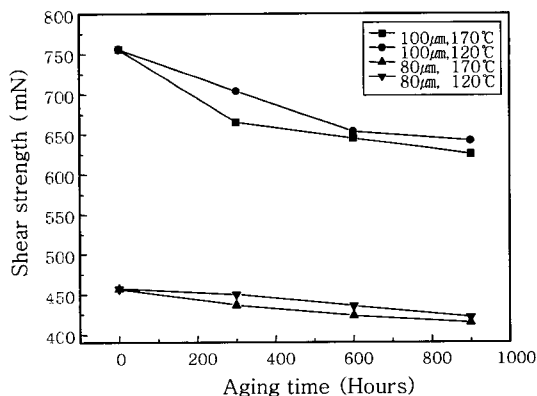


Fig. 5 Relation between aging time and shear strength on variable aging time and pad size

80 μm 패드 시편의 경우에는 457mN에서 414 mN으로 감소하여 같은 시간의 시효처리로 약 10% 정도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 120 $^{\circ}\text{C}$ 의 시효처리 후에 측정된 전단강도 값은 100 μm 시편의 경우 시효처리 이전의 값과 비교해서 약 18%, 80 μm 시편의 경우에는 약 8%가 감소하였다. 결과적으로 시효시간이 길어질수록 강도 값이 낮아지는 경향을 보였으며, 시효온도가 높을수록 강도 값의 저하가 크다는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 이러한 강도값의 저하 원인은 Cu와 Sn이 반응함으로써 UBM 경계에서 상대적으로 Pb rich가 성장하기 때문이다. 또한 100 μm 와 80 μm 패드 크기의 시편에서 전단강도 값을 비교해보면 시효처리 후 전단강도의 저하가 패드 크기가 큰 시편에서 크게 나타난다. 이와 같은 결과는 패드 위에 형성되는 솔더 범프의 접촉 면적인 솔더부피의 차이로 인해 발생하는 것으로 생각된다. Fig. 6은 80 μm 패드에서 시효처리 이전과 600시간 시효 후 측정된 전단강도와 변위의 관계를 나타낸 것이다. 솔더 범프를 형성하기 위해 리플로우 과정을 거친 시효처리 이전의 시편에서는 변위량이 많이 발생하나, 600시간 시효 후의 시편은 솔더의 미세조직인 Sn rich와 Pb rich의 성장으로 변위량이 적게 발생하였다.

Fig. 7은 시효 이전 시편의 전단시험된 파면의 형상을 나타낸 것이다. 그림 내부에 표시된 흰색 화살표는 전단시험시 팁의 이동방향을 표시한 것이다. 그림에서와 같이 시효 이전의 파면에서는 솔더와 UBM의 접촉 형태인 원형을 유지하는 것을 볼 수 있으며, 파면을 확대

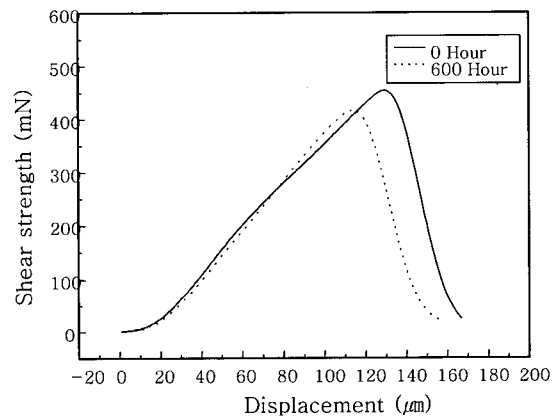


Fig. 6 Shear strength vs displacement curve

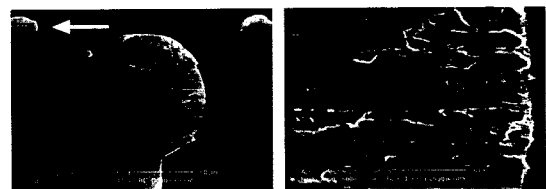


Fig. 7 Fractured surface of a sheared solder bump before aging(100 μm pad)

한 오른쪽 그림에서 그 원인이 솔더내의 Sn과 Pb 성분
에 의한 부분적인 연성 파괴임을 나타내고 있다.

Fig. 8은 170°C 분위기에서 900시간 동안 시효 후
시편의 파면으로 연성파괴 모드를 나타낸다. 이러한 연
성파괴 모드는 Cu 위에서의 주요한 파괴 모드이며 시효
시간이 증가함에 따라 같은 경향을 나타낸다. 그러나 시
효 시간이 길어질수록 연성파괴 뿐만 아니라 취성파괴
현상이 부분적으로 관찰된다.

또한 시효처리 이전의 Au 스테드 범프에서는 80 μ m
패드의 경우 388mN의 전단강도 값을 보였으며, 100 μ m
에서는 530mN을 나타내었다. 이 값은 솔더 범프에 비
해 18% 정도 감소한 값이다. 그러나 Au 스테드 범프
에서는 솔더 범프와 달리 시효처리 300시간 이후에는
시효 시간이 경과해도 전단강도 값에는 큰 차이가 없음을
확인하였다. Fig. 9와 10은 Au 스테드 범프에서 시
효 온도 170°C에서 시효처리 이전과, 300시간 시효후
관찰된 파면을 나타낸 것이다. 모든 파단면은 와이어 본
딩에 의한 접합 자국이 관찰되었으며, 시효 시간이 경과
하면 Al과 Au의 반응으로 IMC인 AlAu₄의 생성이 보
고되었다⁷⁾.

Fig. 11은 300시간 시효처리 된 솔더/UBM 계면의
TEM과 EDS분석 결과를 나타낸 것으로, 솔더와 IMC

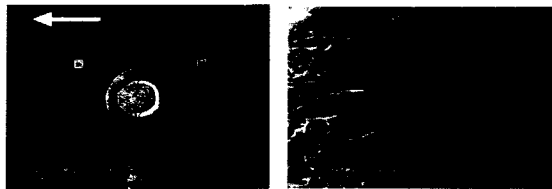


Fig. 8 Fractured surface of a sheared solder bump
after aging at 170°C for 900 hours(80 μ m pad)



Fig. 9 Fractured surface of a sheared Au stud
bump before aging(80 μ m pad)

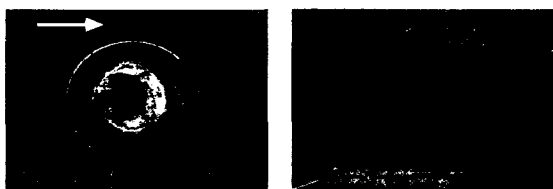


Fig. 10 Fractured surface of a sheared Au stud
bump after aging at 170°C for 300 hours
(80 μ m pad)

층의 미세 조직상태가 관찰되었다. 그림에서 밝은색 부
분의 b 영역은 Sn이 많은 Sn-rich상이고, 검은색 부분
의 c 영역은 Pb가 많은 Pb-rich상이다. 솔더의 미세조
직인 Sn-rich와 Pb-rich는 시효시간이 경과할수록 상
의 크기가 성장한다. 또한 a 영역은 Cu-Sn IMC로 확
인되었으며 계면에 형성된 IMC는 부채꼴(scallop) 형
태이다. 이 Cu-Sn IMC 층의 두께는 솔더 접합부의 전
단강도와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 최대 전단강도
값을 갖는 IMC층 두께의 임계값이 존재한다⁸⁾. 일반적
으로 리플로우 솔더링 공정 후 SEM으로 접합 계면을
관찰하면, 용융상태에서 Cu₃Sn 보다 Cu₆Sn₅의 성장이
훨씬 빠르기 때문에 Cu₆Sn₅만이 관찰되며 Cu₃Sn의 경
우 고온에서 장시간 시효처리 하였을 경우에 관찰된다.
그러나, 솔더링 공정 후에도 수백 Å 두께의 얇은
Cu₃Sn이 형성되는 것으로 알려져 있다²⁾. 솔더 범프가
형성된 시편이 300시간의 시효처리 과정을 거치면서

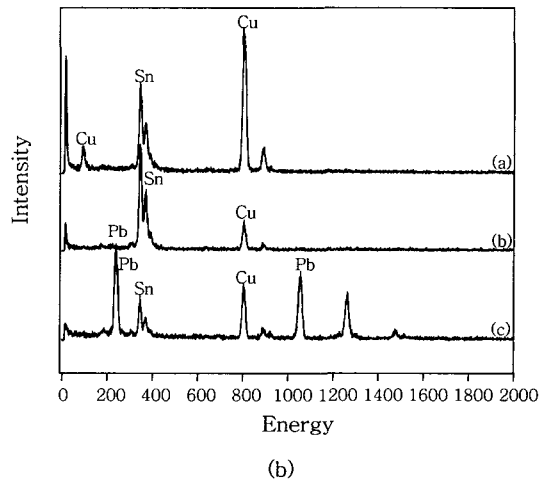
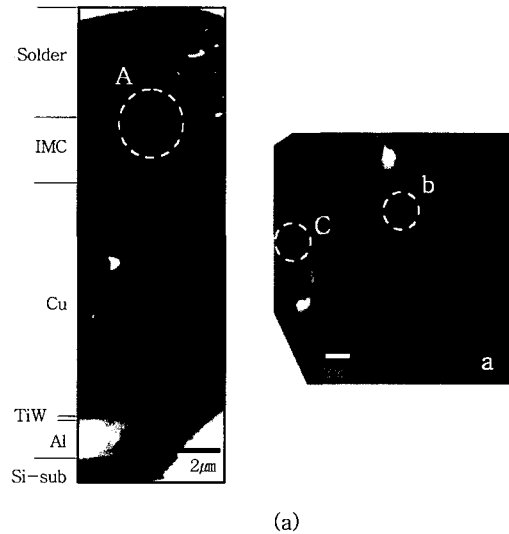


Fig. 11 TEM images of UBM-solder interface after
300 hours of aging (a) magnification photo-
graph (b) EDS

Cu-Sn IMC($\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$)가 $3.0 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 두께로 성장한 것을 EDS 분석을 통하여 확인하였다.

Fig. 10에 나타낸 EDS 분석 결과 a 영역에서 검출되는 Cu 성분은 시료를 붙여놓은 그리드(grid)에서 나온 것으로 생각된다. 또한 밝게 나타나는 부분(구리 및 솔더부위)은 국부적으로 시료 준비과정에서 과다 용해된 때문이다.

4. 결 론

초고속 광통신 모듈에 사용되는 포토 다이오드의 패드 표면에 3개의 솔더 범프를 형성시켜 범프/UBM의 접합 강도와 등온 시효처리에 따른 강도변화를 전단실험을 통해 측정하였고, IMC 성장을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 솔더 범프는 패드 크기와 무관하게 전단강도 값은 시효 시간과 온도가 증가함에 따라 감소하였고, 전단강도 값의 저하 정도는 시효 온도가 높을수록, 패드의 크기가 클수록 크게 나타났다. 그러나 Au 스테드 범프에서는 300시간 이후에는 시효시간이 경과해도 전단강도 값에는 큰 차이가 없음을 확인하였다.

2) 300시간의 시효처리 과정을 거치면서 IMC($\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$)가 $3.0 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 의 두께로 성장하였다.

3) $80 \mu\text{m}$ 패드 크기에서 전단강도 값은 Au 스테드 범프는 솔더 범프에 비해 18% 정도 감소한 값을 나타내었다.

4) FIB 가공 기술은 미세 솔더 접합부의 TEM 관찰용 박막시료 제작에 유용한 기술임을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Y.B. Sun, K.S. Kim, H.J. Chang : Study on the UBM Design and Flip-chip Bonding Technology for Optoelectronic Communicationmodule, Electronics and Telecommunications Research Institute, 2002
2. R. F. Pinizzotto, E. G. Jacobs : The Dependence of the Activation Energies of Intermetallic Formation on the Composition of Composite Sn/Pb Solders, IEEE/IRPS, (1993), 209-213
3. A. R. Mickelson, N. R. Basavanhally, and Y. C. Lee : Optoelectronic Packaging, New York: Wiley, ch. 5 (1997)
4. Hirohisa Matsuki, Hiroshi Ibuka : TEM Observation of Interfaces in a Solder Joint in a Semiconductor Device, Advances Materials 3, (2002), 261-270
5. Xingjia Huang, S.W. Rickly Lee : Experimental Investigation on the Progressive Failure Mechanism of Solder Balls During Ball Shear Test, ECTC, (2002), 968-973
6. K.S. Kim, Y.B. Sun, E.G. Chang : Aging Characteristic of Shear Strength of Micro Solder Bump, Journal of KWS, 20-5 (2002), 60-65 (in Korean)
7. Atsuko Iida, Yukio Kizaki : The Development of Repairable Au-Al Solid Phase Diffusion Flip-Chip Bonding, ECTC, (1997), 101
8. J.H. Lee, Y.S. Eom : Reaction Characteristics between In-15Pb-5Ag Solder and Au/Ni Surface Finish and Reliability Evaluation of Solder Joint IMAPS-Korea, 9-26 (2002), 1-9 (in Korean)