

무연솔더 도금된 리드프레임에서 Sn 위스커의 성장과 구조

김경섭^{a,*} · 임영민^b · 유정희^c

^a여주대학 전자과, ^b호진 플라텍, ^c한국전자통신연구원

Structure and Growth of Tin Whisker on Leadframe with Lead-free Solder Finish

Kyung-Seob Kim^{a,*}, Young-Min Leem^b and Chong-Hee Yu^c

^aYejoo Institute of Technology, Yeojoo 469-705, Korea

^bHojin Platech, Ansan 442-760, Korea

^cElectronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-350, Korea

초 록: 주석 도금은 특정 환경하에서 위스커를 발생시키며, 이는 전자부품의 불량을 초래한다. 최근 세계곳곳에서는 환경보호를 위해 “무연”의 사용을 권고하고 있다. 본 논문에서는 두 종류 무연 도금 재료에서 도금 온도와 신뢰성시험 하에서 성장하는 위스커를 평가하였다. 도금 온도가 높아질수록 표면에 형성되는 도금 입자의 크기는 커지고, 위스커의 성장은 작아진다. 또한 온도 순환시험에서 성장한 위스커는 무광택 Sn 도금은 굽은 모양을, 무광택 Sn-Bi에서는 줄무늬 모양이 관찰되었고, Sn 도금에 비해 Sn-Bi에서 위스커가 작게 성장하였다. 무광택 Sn 도금된 FeNi42 리드프레임은 TC 300 사이클에서 직경이 7.0~10.0 μm 이고, 길이가 25.0~45.0 μm 인 위스커가 성장하였다. 또한 Cu는 300 사이클에서는 표면에 노들(핵 상태)만이 관찰되었고, 600 사이클에서 길이가 3.0~4.0 μm 의 위스커로 성장하였다. TC 600 사이클 후 FeNi42는 계면에서 ~0.34 μm 의 얇은 Ni_3Sn_4 가, Cu에서는 두께가 0.76~1.14 μm 인 Cu_6Sn_5 와 ~0.27 μm 의 Cu_3Sn 화합물들이 두껍게 성장하였다. 따라서 FeNi42 리드프레임은 열팽창계수의 차이, Cu에서는 금속간 화합물의 형성이 위스커의 성장에 영향을 미치는 주요 인자이다.

Abstract: Tin plating on component finishes may grow whiskers under certain conditions, which may cause failures in electronics equipment. To protect the environment, “lead-free” among component finishes is being promoted worldwide. This paper presents the evaluation results of whiskers on two kinds of lead-free plating materials at the plating temperature and under the reliability test. The rising plating temperature caused increasing the size of plating grain and shorting the growth of whisker. The whisker was grown under the temperature cycling the bent type in matt Sn plating and striated type in matt Sn-Bi. The whisker growth in Sn-Bi plating was shorter than that in Sn plating. In FeNi42 leadframe, the 7.0~10.0 μm diameter and the 25.0~45.0 μm long whisker was grown under 300 cycles. In the 300 cycles of Cu leadframe, only the nodule(nuclear state) grew on the surface, and in the 600 cycles, a 3.0~4.0 μm short whisker grew. After 600 cycles, the ~0.34 μm thin Ni_3Sn_4 formed on the Sn-plated FeNi42. However, we observed the amount of 0.76~1.14 μm thick Cu_6Sn_5 and ~0.27 μm thin Cu_3Sn intermetallics were observed between the Sn and Cu interfaces. Therefore, the main growth factor of a whisker is the intermetallic compound in the Cu leadframe, and the coefficient of thermal expansion mismatch in FeNi42.

Keywords: Tin whisker, Lead free, Leadframe, Temperature cycling, Intermetallic compound

*Corresponding author
E-mail: kkseob@mail.yejoo.ac.kr

1. 서 론

납이 함유된 솔더는 PTH(Plating Through Hole) 나 SMD(Surface Mounting Device) 형태의 패키지 외부 리드의 표면도금 물질로 많이 사용되어 왔다. 최근에 납의 환경 유해성 문제가 대두되면서 Sn-Pb의 대체 물질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 그러나 솔더 조성에 관한 연구가 대부분이고, 전자부품에 대한 무연도금의 조성이나 연구에 대해서는 상대적으로 저조한 실정이다. 현재까지 많은 Sn-Pb 대체물질 및 공정이 연구되어 왔으며 제안된 무연도금 조성은 순수 Sn, Sn-Bi, Sn-Cu, Sn-Zn 및 PPF(Palladium Pre-plated Frame) 등이다.⁵⁾ 그러나 Sn-Bi 리드 도금은 Bi의 취성으로 인해 패키지 조립공정에서 포밍(forming) 공정 후 리드 어깨(shoulder) 부위에 균열(crack)이 발생한다. 이로 인해 소지 금속이 노출되어 부식이나 솔더의 non-wet, dewet 현상이 일어난다. Sn-Ag의 경우는 Ag 함량에 따른 급격한 녹는점의 변화와 도금 조성의 제어를 위해 용액내에 첨가하는 착화제(complexing agent)로 인한 용액의 불안정성이다. 또한 Sn-Zn은 녹는점이 낮다는 장점이 있으나 Zn의 큰 산화력으로 인해 솔더링시 Zn이 산화되어 솔더링 불량 및 전용 플럭스의 개발이 요구된다. Sn-Cu는 소지 금속이 Cu(동) 리드프레임인 경우 조성 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 현재 무연 제품으로 출시하고 있는 Sn 도금의 경우 표면에 위스커(whisker) 형성으로 인한 단락 불량에 대한 문제점이 해결해야 할 과제로 남아있다.⁶⁻¹²⁾ 현재 위스커는 정도의 차이는 있으나 Sn 또는 Sn계 무연 도금층에서는 모두 발생하고 있으며, 아직까지 없애는 방법보다는 줄이는 방법으로서의 연구가 진행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 양산 도금공정 조건하에서 두 종류 리드프레임에 도금온도를 변화시켜 무광택 순수 Sn과 무광택 Sn-Bi 도금층에서 발생하는 위스커의 성장을 관찰하였다. 또한 다양한 신뢰성시험 조건에서 위스커의 형성과 성장을 고찰하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 스탬프드(stamped) 리드프레임은

FeNi42(Alloy 42)는 64 QFP(6.0×6.0mm)이고, Cu(C7025R-1/2H)는 160 MQFP(6.35×6.35mm)이다. 각각의 두께는 0.1524mm이다. Table 1에 FeNi42(Hitachi Metal)와 Cu(Nippon Mining & Metals) 리드프레임의 성분을 나타내었다. 도금층(피막)은 호진 플라텍사의 무광택 순수 Sn과 Sn-10Bi 용액을 사용하여 전기도금법으로 제조하였다. 시편의 전처리는 상온에서 전해 탈지를 1분간 실시한 후 에칭액에 20초간 침적 처리하여 표면에 생성된 산화 피막을 제거하고 균일한 조도를 형성시켰다. 도금조건들은 FeNi42 리드프레임은 HT : 50 ml/l 에 Sn : 40 g/l과 산(acid) : 200 ml/l를 혼합하여 전류밀도는 10A/dm²를, 도금시간은 90초를 적용하였다. 음극이 좌우로 움직이도록 벨트 속도를 4.5 m/min, 전극(electrode) 거리는 65 mm로 일정하게 유지하였고, 도금조내 전해액의 온도를 일정하게 유지하기 위해 자동온도 조절장치를 이용하였다. Cu 리드프레임은 FeNi42 리드프레임 조건에 전류밀도를 7A/dm²로 변화시켜 도금하였다. 또한 각각의 샘플은 도금온도를 30°C, 40°C, 50°C로 변화시켜 제작하였다. 실험에서 사용된 HT 용액은 황산과 유기산(methane sulfonic acid: CH₃SO₃H)을 기본 전해질로 사용하는 무광택 Sn 도금액으로 알킬(alkyl) 계열의 첨가제를 사용한다. 도금층내의 유기물 함량이 0.005wt%로 납땀성이 우수한 특성을 가지고 있다. 세가지 온도 조건에서 형성된 Sn 도금층의 평균 두께는 FeNi42는 7.6±0.2 μm이고, Cu는 6.6±0.2 μm이다.

TC(Temperature Cycling) 시험은 -55°C~125°C의 온도조건에서 600 사이클을 진행하였고, 챔버는 71H-W(TABAI ESPEC)를 1 사이클 30분으로 적용하였다. 또한 항온조건은 50°C의 항온조속에 2개월간 방치하였다. 도금 표면의 형상은 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy)으로 관찰하였고, 성장방향 분석은 XRD(X-Ray Diffraction; X-Pert MRD, Philips)을 이용하였다. TEM(Transmission Electron Microscopy) 시료는 시편에 W를

Table 1. Composition of FeNi42 and C7025R leadframe(wt%)

Leadframe	Cu	Fe	Ni	Si	Mg	Mn
C7025R	BAL.	-	2.20	0.25	0.05	-
FeNi42	0.02	BAL.	41.23	0.30	-	0.80

증착하고, Ga⁺ 이온을 source로 한 가속전압 30 keV FIB (Focused Ion Beam)를 사용하여 가공하였으며, 100pA 빔 전류를 갖는 Ga⁺ 이온 빔을 이용한 미세 밀링을 통하여 박막의 시료를 제조하였다. FIB 시료 가공은 MC-100(MICRION)을, TEM은 JEM-2010UHR(JEOL)을 이용하여 가속전압 200 keV에서 관찰하였다. 도금층의 두께 분석은 XRX Series(CMI)를 사용하였고, 각각의 실험조건에서 성장한 위스커의 길이는 3개의 샘플에서 측정된 평균값을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1과 Fig. 2에는 무광택 Sn 도금된 FeNi42와 Cu 리드프레임에서 도금온도에 따른 입자 구조와 표면 형상을 나타내었다. 그림에서와 같이 도금온도가 높아질수록 표면의 도금입자 크기가 커지는 경향을 보였다. 그러나 실험에서 사용된 HT 용액은 50°C의 도금온도에서도 도금입자의 평균크기는 약 2.5~3.5 μm 이내로 조밀한 도금입자를 구성하였다.

Sn 도금된 FeNi42 리드프레임에서 도금온도에 따른 입자구조의 분포를 XRD로 분석하여 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 도금층의 주성분은 Sn이 90wt%로 입자의 구조는 주로 Sn 도금입자에 의하여 결정되므로 도금층에서 Sn의 입자구조 분포만 측정하였다. Fig. 3과 같이 도금온도에 의해서 도

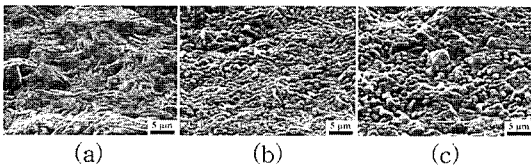


Fig. 1. Grain structure and surface morphology of matt tin plated FeNi42 leadframe (a) 30°C (b) 40°C (c) 50°C.

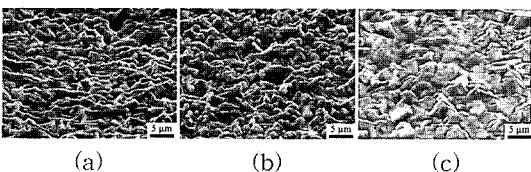


Fig. 2. Grain structure and surface morphology of matt tin plated Cu leadframe (a) 30°C (b) 40°C (c) 50°C.

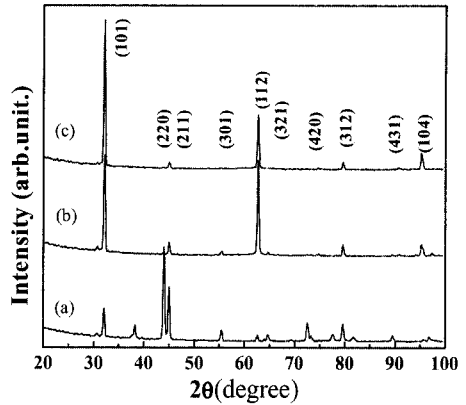


Fig. 3. X-ray diffraction pattern of matt tin plated FeNi42 leadframe (a) 30°C (b) 40°C (c) 50°C.

금입자의 구조와 분포에 변화가 발생하였다. 도금층의 우선 성장방향을 구하기 위해 식 1³⁾을 이용하여 T_c(Texture Coefficient)를 구하였고, 결과를 Table 2에 나타내었다. FeNi42에서 우선 성장방향은 (a) (220) (b) (112) (c) (112)을 나타내었다. Fig. 3의 (b)와 (c)의 경우 (101)이 (112)면보다 절대강도는 크지만, JCPDS card⁴⁾ ((101)=90, (112)=23)와 비교하면 상대적으로 작은 회절 강도를 가지는 (112)면의 상대회절 강도가 크기 때문에 (112)면의 배향성이 크고, 따라서 T_c 값도 큰 값을 가지게 된다. Cu의 우선 성장방향은 (a) (301) (b) (101) (c) (101)을 나타내었다. FeNi42 도금층 면들의 결정방위와 Sn 결정구조를 고려하여 각 면들 사이의 사잇각(angle between two crystal planes)을 구하였다. 또한 계산된 각 면들의 TC 값을 적용하여 각 면들이 만들 수 있는 사잇각의 상대치를 구하여, 일정한 사잇각에서 상대치의 합을 Table 3에 나타내었다.

$$T_c(hkl) = \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)} \left[\frac{1}{n \sum I_0(hkl)} \right]^{-1} \quad (1)$$

I(hkl) : 시험편에서 측정된(hkl) 반사의 적분강도
I₀(hkl) : 표준 분말시료에서 측정된 반사의 적분강도
n : 반사면의 총수

Table 2와 같이 도금온도 30°C에서 TC는 우선 성장방향인 (220)에서 가장 큰 2.88의 값을 보였다. 그러나, 40°C와 50°C의 도금온도조건에서는 (112)

Table 2. Texture coefficient of matt tin plated FeNi42 leadframe on various temperatures

Temp. (°C)	(101)	(220)	(211)	(301)	(112)	(420)	(312)
30	0.34	2.88	0.76	0.63	0.27	1.29	0.84
40	0.86	-	0.13	0.16	3.43	-	0.38
50	1.49	-	0.08	-	2.11	-	0.32

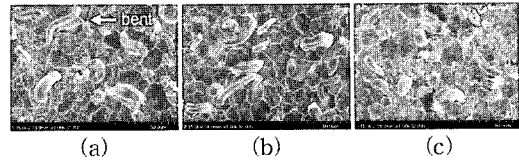
에서 가장 큰 3.39와 2.11을 보였다. 도금온도 30°C에서 형성된 시편의 도금층을 분석한 결과 도금층의 사잇각은 다양하게 나타났다. Table 3과 같이 30~40°C에서 많은 도금층이 형성되었고, 0~10° 사이를 제외한 나머지 각도에서는 비슷한 비율로 이루어져 있었다. 그러나, 40°C와 50°C에서는 큰 사잇각(30~50°)의 비율이 작은 사잇각(10~20°)의 비율보다 상대적으로 작게 구성되어 있었다.

두 종류의 Sn 도금된 리드프레임을 비교한 결과 서로 다른 위스커 성장거동을 보였다.

Fig. 4는 FeNi42 리드프레임에서 TC 300 사이클 처리 후에 성장한 위스커의 형상을 나타내었다. 표면에 형성된 도금입자의 크기가 클수록 위스커의 성장이 작아지는 경향을 보였다. 세가지 온도 조건의 도금층에서는 굽은(bent) 모양의 위스커가 형성되었고, 크기는 직경이 7.0~10.0 μm이고, 길이는 25.0~45.0 μm이다. 따라서 단위 면적당 위스커의 밀도(성장 빈도수)가 높았다. 전체 도금 영역에서 상대적으로 긴 위스커는 산발적으로 분포하였고, 주로 작은 위스커들이 표면 전체에서 성장하였다. 이러한 작은 위스커들은 추가적으로 진행되는 TC에 의해 지속적으로 성장한다. 이와 같이 TC 조건에서 위스커가 활발하게 성장하는 주요 원인

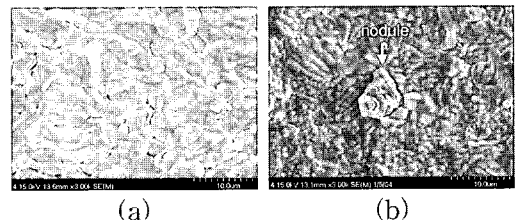
Table 3. The angle between two crystal planes at the lattice of plating layer

angle(°)	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	
30°C	sum	0	4.74	3.48	5.42	4.25
	%	0	26.50	19.50	30.30	23.90
40°C	sum	0	3.33	1.63	0.45	0.55
	%	0	55.90	27.30	7.60	9.20
50°C	sum	0	3.65	0.80	0.17	0
	%	0	79.00	17.30	3.70	0

**Fig. 4.** Tin whisker grown on matt tin plated FeNi42 leadframe after TC 300 cycles (a) 30°C (b) 40°C (c) 50°C.

은 FeNi42(4.3ppm/°C)와 Sn(23.0ppm/°C) 사이의 큰 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 압축 응력에 의존하기 때문이다. 이러한 응력은 각 면들 사이의 사잇각이 클수록 완충작용에 의해 응력에 대한 영향을 적게 받는 것으로 보고되었다¹¹⁻¹²). 그러나 본 연구의 실험조건에서 형성된 사잇각은 다양한 분포를 가지므로, 사잇각과 위스커의 연관성을 규명하기는 어려웠다. 그러나 위스커의 발생이 적었던 50°C의 경우 작은 사잇각의 비율이 많은 것은 위스커의 성장이 사잇각 보다는 도금입자의 크기에 많이 의존하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Sn 도금된 Cu 리드프레임에서 TC 수행 후에 성장한 위스커를 나타내었다. Fig. 5(a)는 300 사이클 후의 표면 형상으로 위스커의 성장이 관찰되지 않았다. 그러나 도금입자의 평균 크기는 약 5.0~7.0 μm로 성장하였고, 부분적으로 노들(nodule, 위스커까지 성장하지 않은 핵 상태) 모양이 관찰되었다. 노들에는 어떠한 화합물의 형성도 나타나지 않았고, 이로부터 특정의 원소를 근원으로 위스커가 발생하는 것은 아니라고 판단된다. Sn과 Cu 계면에서 불규칙하게 성장하는 IMC(Intermetallic Compound)는 Sn 부피를 감소시키고, 도금층의 내부에 압축 응력을 발생시킨다. 여기에 도금입자가 작으면 도금층 표면의 약한 부분인 결정립

**Fig. 5.** Tin whisker grown on matt tin plated Cu leadframe at 30°C plating temperature (a) after TC 300 cycles (b) after TC 600 cycles.

의 경계면은 많아지기 때문에 위스커가 쉽게 성장한다. Fig. 5(b)는 600 사이클 후의 결과로 길이 3.0~4.0 μm 의 작은 위스커가 형성되었다. 이와 같이 Cu 리드프레임의 경우 TC 조건이 위스커의 성장에 영향을 적게 미친다. 이 이유는 두가지 원인이 존재한다고 보고되고 있다⁷⁾. 첫째는 Sn과 Cu(16.6 ppm $^{\circ}\text{C}$) 사이의 열팽창 계수 차이가 크지 않다. 둘째는 Cu의 경우, 저온(23 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$)에서는 IMC의 성장이 불규칙하고 위스커의 성장이 활발하다. 고온한계 125 $^{\circ}\text{C}$ 를 가지는 TC의 경우 IMC의 불규칙한 성장이 저지되기 때문이다. 125 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 bulk 확산 메커니즘이 Sn의 결정 입계를 따른 확산보다 Cu 원자가 Sn 기지(matrix)로 확산되는 메커니즘을 보인다. 이와 같은 결과는 IMC의 형성에 의해 발생하는 압축 응력을 감소시키고, 결과적으로 위스커의 성장을 없애거나 감소시킨다.

Fig. 6에는 TC 600 사이클 처리 후에 성장한 위스커의 단면 형상을 나타내었다. Fig. 6(a)에서와 같이 단면에서는 굽은 모양으로 성장한 위스커 전체 형상중 일부분이 관찰되었다. 그러나 (b)에서는 노들 모양으로 성장한 형상이 관찰되었다. 두 종류의 리드프레임에서 TC 600 사이클까지는 위스커의 성장이 활발하였으나, 이후로는 점차 둔화되었다.

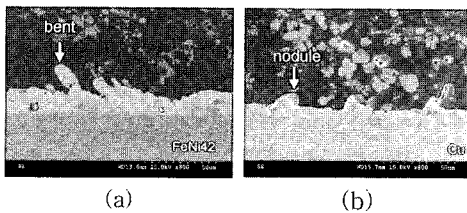


Fig. 6. Cross section of whisker shape after TC 600 cycles (a) FeNi42 leadframe (b) Cu leadframe.

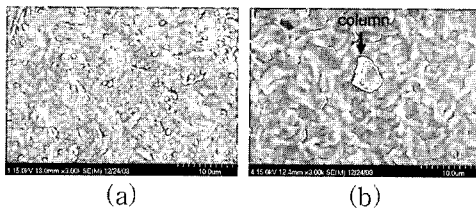


Fig. 7. Tin whisker grown on matt tin plated leadframe after 60 days of 50 $^{\circ}\text{C}$ (a) FeNi42 leadframe (b) Cu leadframe.

Fig. 7은 도금온도 30 $^{\circ}\text{C}$ 에서 피막이 형성된 두종류 리드프레임을 50 $^{\circ}\text{C}$ 조건에서 60일 동안 보관 처리 후 관찰된 위스커를 나타내었다. FeNi42는 일부 영역에서 핵의 성장만 관찰되었고, Cu에서는 길이 5 μm 정도의 기둥(column) 모양과 유사한 위스커가 성장하였다. 그러나 단위 면적당 위스커의 밀도가 작았으며, TC 600 사이클에서 나타낸 경향과 비슷하였다.

Fig. 8은 FeNi42 리드프레임에서 무광택 Sn-Bi 도금후 TC 300 사이클에서 성장한 위스커를 나타내었다. 위스커의 크기는 직경이 9.0 μm 이고, 길이는 8.0~9.0 μm 로 Sn 도금에 비해 작게 성장하였다. 성장한 위스커는 줄무늬(striated) 모양이 관찰되었다. 또한 Sn-Bi 도금은 Sn 도금에서는 나타나지 않았던 도금층의 균열 현상이 발생하였으며, TC 횟수가 증가할수록 폭 넓은 균열로 진전되었다. 이와 같은 결과는 Bi 자체의 취성과 Bi의 함량이 10wt%로 높아지면 경도가 증가하기 때문으로 판단되며, 상용화되고 있는 3~4wt% 이내의 Bi 조성에서는 균열 현상이 발생하지 않았다. 따라서 도금용액의 조성과 시험조건이 위스커의 발생과 모양에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 무광택 Sn도금에서 도금온도 30 $^{\circ}\text{C}$ 의 시편을 TC 600 사이클까지 수행한 후 TEM 관찰 결과를 나타내었다. Fig. 9(a)는 Sn 도금층과 FeNi42 계면을 분석 한 결과로 3 영역의 상부에 형성된 노들 모양의 위스커는 Sn(tetragonal structure)으로 판명되었다. 2 영역은 Sn과 Ni의 반응에 의해 ~0.34 μm 의 얇은 층상의 Ni₃Sn₄가 성장하였고, 4 영역에 비해 3 영역에서 큰 Sn 결정립이 형성되었다. 또한 4 영역에서는 Sn의 결정립 경계에 부분적으로 Ni pile-up이 관찰되었으며, 우측에 확대사진과 TEM-EDS 맵핑(mapping) 결과를 나타내었다.

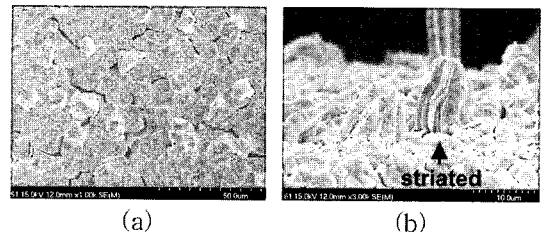
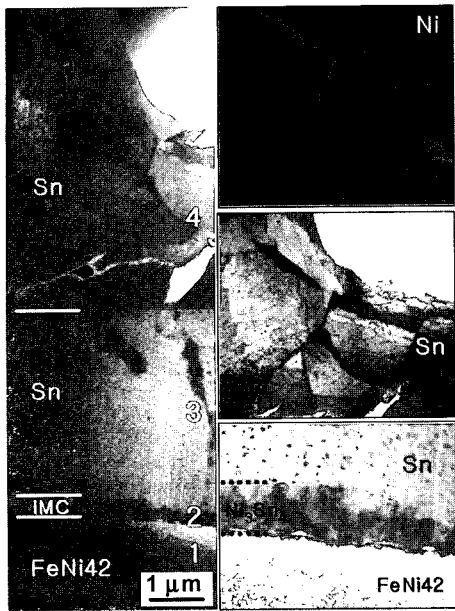
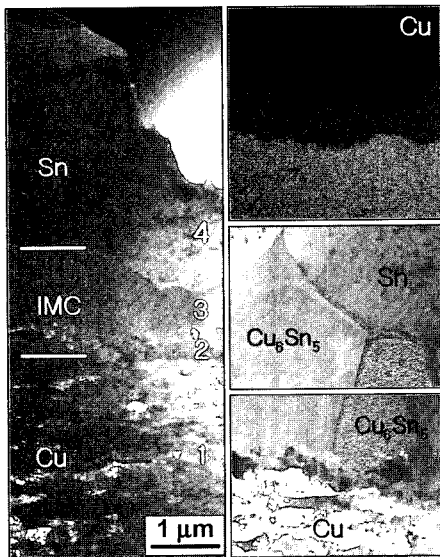


Fig. 8. Whisker grown on matt Sn-Bi plated FeNi42 leadframe after TC 300 cycles.



(a)



(b)

Fig. 9. Bright-field TEM and magnification image showing whisker (a) FeNi42 /Sn plating (b) Cu/Sn plating.

Fig. 9(b)는 Sn 도금층과 Cu 계면에서 형성된 미세조직을 관찰한 것이다. 2와 3 영역에서 Sn과 Cu의 반응으로 성장한 $0.76\sim 1.14\ \mu\text{m}$ 의 $\eta\text{-Cu}_6\text{Sn}_5$ 와 $\sim 0.27\ \mu\text{m}$ 의 $\epsilon\text{-Cu}_3\text{Sn}$ 화합물이 형성되었다. Cu 리드프레임에서 불규칙하게 형성된 IMC층의 두께

는 FeNi42에 비해 약 4배 많이 성장하였다. 또한 4 영역의 Sn 도금층에서는 결정립 경계에서 부분적으로 Cu pile-up이 관찰되었다. 결론적으로 Sn 도금된 Cu 리드프레임은 IMC의 형성에 의해 발생하는 압축 응력이 위스커의 성장과 밀접한 관계가 있으며, FeNi42에서는 재료간의 열팽창계수 차이에 의해 위스커가 주로 성장하지만 금속계면에서는 작은 두께의 IMC도 형성됨을 확인하였다. 향후 IMC가 위스커의 성장에 미치는 영향에 대해 지속적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

무광택 순수 Sn과 무광택 Sn-Bi 도금층에서 발생하는 위스커의 성장을 고찰하기 위해 FeNi42와 Cu 리드프레임을 적용하여 실험하였다. 또한 TC와 50°C 보관조건에서 위스커를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 도금온도가 높아질수록 표면에 형성된 도금 입자의 평균 크기는 증가하고, 위스커의 성장은 작아지는 경향을 보였다.
2. 무광택 순수 Sn 도금보다 무광택 Sn-Bi 도금에서 작은 위스커가 성장하였다. 순수 Sn 도금은 굽은 모양과 작은 혹 모양을, Sn-Bi에서는 줄무늬 모양의 위스커가 관찰되었다. 따라서 도금용액의 조성 조건이 위스커의 발생과 모양에 많은 영향을 미친다.
3. 무광택 Sn 도금된 FeNi42에서 위스커의 성장은 TC 횟수에 크게 의존하였다. 그러나 Cu는 600 사이클 후에도 길이 $3.0\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 의 위스커가 형성되어 TC에 의한 영향을 적게 받았다.
4. 리드프레임에서 FeNi42는 열팽창계수의 차이, Cu에서는 금속간 화합물의 형성이 위스커의 성장에 영향을 미치는 주요 인자이다.

참고문헌

1. M. Abtey and G. Selvaduray: Lead free solders in microelectronics, Materials Science and Engineering, 27, pp.95-141(2000).
2. K. Zeng and K.N. Tu: Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology, Materials Science and Engineering, R 38, pp.92-101(2002).

3. C. S. Barrett and T. B. Massalski: Structure of Metals, 3rd edition, Pergamon, New York, pp.204-205(1966).
4. Joint Committee on Power Diffraction Standards, 02-0713, (1999).
5. J. S. Kadesch: Effects of conformal coat on tin whisker growth, Proc 37th IMAPS Nordic Annual Conference, September, pp.108-116(2000).
6. Y. Takeuchi and K. Fujiwara: Pb whisker growth from liquid phase on Pb-alloy Josephson device chips, J. Appl. Phys., 54, pp.6053-6054(1983).
7. K.N. Tu: Cu/Sn interfacial reactions: thin-film case versus bulk case, Materials Chemistry and Physics, 46, pp.217-223(1996).
8. B. Z. Lee and D. N. Lee: Spontaneous growth mechanism of tin whiskers, Acta Mater., 46-10, pp.3701-3714(1998).
9. M. Dittes, P. Oberndorff, and P. Petit: Tin whisker formation-result, test methods and countermeasures, ECTC, pp.822-826(2003).
10. T.T. Sheng, C.F. Hu, W.J. Choi, and K.N. Tu: Tin whisker studied by focused ion beam imaging and transmission electron microscopy, J. Appl. Phys., 92 pp.64-69(2002).
11. M. Dittes, P.Oberndorff, and P. Crema: The effect of temperature cycling on tin whisker formation, Electronics Packaging Technology Conference, pp.183-188(2003).
12. W.J. Choi, T.Y. Lee, K.N. Tu, N. Tamura, and et al.: Tin whiskers studied by synchrotron radiation scanning X-ray micro-diffraction, Acta Materialia, 51, pp. 6253-6261(2003).