

주석 휘스커 성장 메카니즘 및 억제방안

오철민 · 정재성 · 구기영 · 윤영호 · 황운희 · 홍원식

The Growth Mechanism and Mitigation Method of Sn Whiskers

Chulmin Oh, Jae Sung Jung, Ki-Young Ku, Young-Ho Yoon, Un Hee Hwang and Won Sik Hong

1. 서 론

최근 유럽연합의 환경규제는 전자산업에 많은 변화를 가져오고 있다. 2006년 7월부터 발효된 “특정유해물질 사용제한 지침(restriction of the use of certain hazardous substance in electronic equipment, RoHS)”¹⁾에 따라 일반 전자제품내 납(Pb) 사용이 제한되어 현재 전자제품들은 무연(Pb-free)화가 되어 있다²⁾. 최근에는 “폐차 활용지침(End-of life vehicles, ELV)”³⁾의 개정으로 2016년부터 자동차 전자제품(car electronics)의 납 사용이 제한되어 자동차 전자제품의 무연화도 활발히 진행되고 있다⁴⁾.

전자제품을 무연화하기 위해서는 많은 사항들이 고려되어야 한다. 기술적인 부분에서는 부품 설계, 기판(PCB) 설계, 솔더링 공정, 솔더 접합부 신뢰성, 주석 휘스커 등으로 구분할 수 있다. 특히, 솔더 접합부 장기 신뢰성^{5,6)} 및 주석(Sn) 휘스커 억제가 전자제품 무연화에 따른 제품의 장기 신뢰성에 가장 중요한 문제로 부각되고 있다. 현재까지 무연화가 적용된 상업용, 민수용 전자제품은 Fig. 1과 같이 국방, 우주용 전자제품보다 사용조건이 가혹하지 않으며 사용 수명이 상대적으로 짧은, 5~10년을 목표로 무연화에 대한 기술개발을 진행하고 있다.

BAE사⁷⁾에 따르면 전자부품 시장은 IT 산업이 62%,

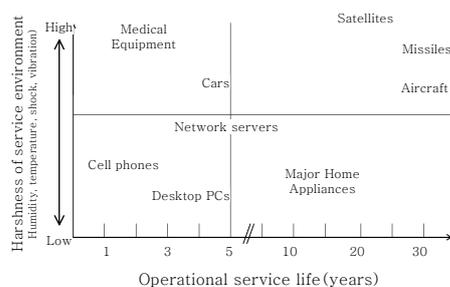


Fig. 1 Pb-free electronics of operation environment and operational life-time⁸⁾

가전산업이 29%, 자동차 산업이 8%를 차지하며 국방, 우주산업은 1% 미만으로 보고하고 있다. 따라서 주요 전자부품들은 무연화 기술이 적용되고 있으며 환경규제에 예외 분야인 국방 및 우주용 전자제품에서도 민수용 전자부품을 사용할 수 밖에 없는 실정이다.

그러나, 국방 및 우주용 전자부품은 민수용 전자부품보다 가혹한 사용환경에서 20~30년 이상의 수명을 요구하고 있어, 무연화적용 기술개발에서 보다 높은 신뢰성을 요구하게 되었다.

전자부품 무연화에 따른 신뢰성은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 기존의 유연(SnPb) 솔더에서 납을 제거한 무연 솔더로 전자부품을 실장함에 따른 솔더 접합부 신뢰성과 기존의 유연 도금에서 납을 제거한 주석 도금 적용에 따른 주석 휘스커 성장이다. 휘스커는 전기적 단락(short)등을 일으켜 전자 모듈의 성능 이상을 유발한다. 이것은 일정시간 잠복기를 거쳐 오랜 시간동안 계속적으로 성장하는 특성을 가지고 있다. 따라서 국방 및 우주분야와 같은 20년 이상의 사용수명을 요구하는 분야에서는 적절한 휘스커 성장 억제 기술 개발현황 및 주요 억제기술에 대하여 고찰하였다.

본 연구에서는 주석 휘스커의 정의 및 주요 고장사례를 소개하고 현재까지 알려진 휘스커 성장기구 및 평가 방법을 분석하였다. 또한, 국방 및 우주용 전자부품의 무연화 적용시 적절한 휘스커 성장 억제기술 개발현황 및 주요 억제기술에 대하여 고찰하였다.

2. 휘스커 정의 및 고장모드

2.1 휘스커 정의

휘스커는 금속 표면에서 원기둥 모양의 단결정이 자발적으로 성장한 수염형상의 금속이며 주로 0.5 ~ 50 μm 두께의 금속 박막 표면에서 관찰된다⁹⁾. 일반적으로 휘스커의 직경은 1~5 μm 이고, 길이는 1~500 μm 정도

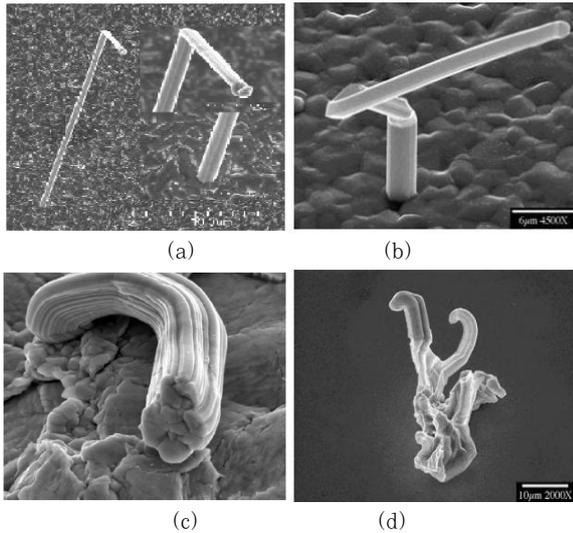


Fig. 2 Various types of Sn whiskers⁹⁾ : (a) filament, (b) kinked, (c) curved and (d) branched

이며, Fig. 2와 같이 여러 가지 형태로 성장한다.

2.2 휘스커 주요 고장모드

2차 세계대전에서 휘스커에 의한 고장이 처음으로 보고되었다¹⁰⁾. 공기 축전기(air capacitor)내부 전극(plate)에서 카드뮴(Cd) 휘스커가 발생되어 고장을 유발되었으며 그 이후에는 아연(Zn), 주석에서도 휘스커가 관찰되어 이를 방지하기 위해 납을 첨가하였다¹⁰⁾.

휘스커에 의한 고장모드는 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 휘스커가 성장하여 부품 리드에 접촉함으로써 부품 리드간 단락을 유발한다. 둘째는 불순물로 존재하여 광학적 특성 및 MEMS(micro-electro-mechanical systems) 특성을 저하시킨다. 그리고 마지막으로 휘스커에 흐르는 전류가 매우 클 경우 휘스커가 금속 가스 상(phase)으로 변하며 아크(arc)를 발생시킨다. Fig. 3은 휘스커로 인한 고장 사례들을 나타내고 있다.

3. 휘스커 성장 및 평가

3.1 휘스커 성장기구

현재까지 알려진 휘스커 성장기구는 주석 도금층 압축 잔류응력에 의해 발생되는 것이다⁹⁾. 이러한 응력은 금속간화합물(intermetallic compound)의 형성, 인장, 압축과 같은 직접적인 기계적 응력, 열팽창 계수 차이에 의한 열기계적(thermo-mechanical) 응력, 표면산화 등에 의해 발생할 수 있다¹²⁻¹⁴⁾.

Fig. 4는 금속간화합물에 의한 휘스커 성장기구를 나

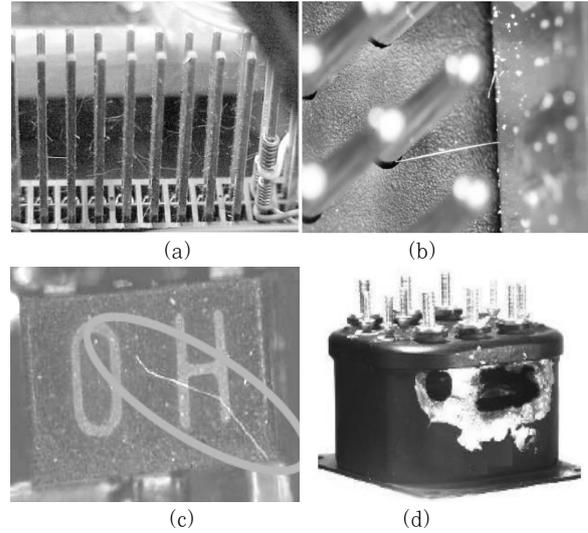


Fig. 3 Various failure modes of Sn whiskers^{8,10,11)} : (a) electrical short, (b) electrical short, (c) contamination and (d) metal vapor arc

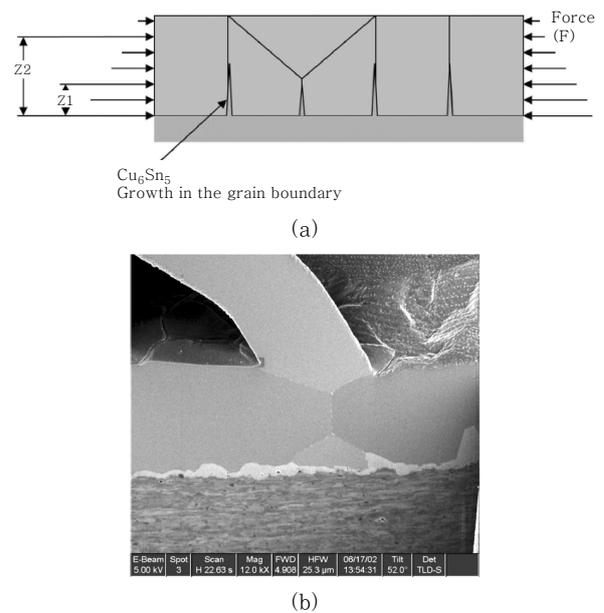


Fig. 4 Tin whisker growth by SnCu intermetallic growth¹²⁾ : (a) simplified representation of force created by SnCu intermetallic growth and (b) typical whisker growth

타낸 것으로, 구리(Cu)와 주석의 금속간화합물(Cu_6Sn_5)은 적절한 온도에서는 주석상의 결정입계를 따라 성장한다. 금속간화합물 성장으로 주석 결정은 압축응력을 가진다. 압축응력이 형성된 주석 결정 중에서 압축응력 방향과 일정 각도를 형성한 결정입계를 가진 결정으로 주석 원자들은 확산하게 된다. 이 주석 원자들의 확산을 통해 주석 휘스커는 성장한다. 그러나, 높은 온도에서는 또 다른 금속간화합물(Cu_3Sn) 성장, 모재 확산을

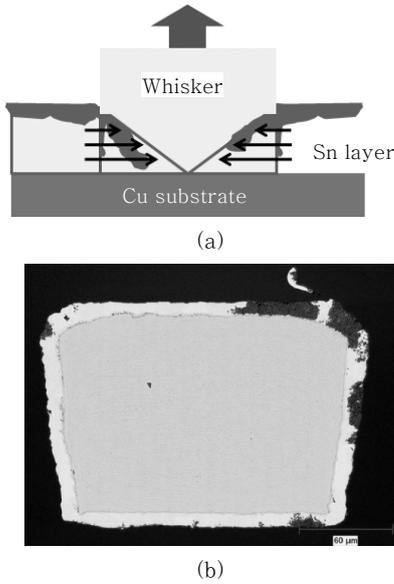


Fig. 5 Tin whisker growth near corroded area of lead : (a) schematic showing the whisker mechanism with corrosion and (b) optical micrograph of cross section of lead after 60°C/93% R.H.¹³⁾

통한 Cu_6Sn_5 성장 등으로 내부 응력이 상대적으로 적게 형성되며 휘스커 성장이 감소되는 경향을 보이기도 한다⁹⁾.

Fig. 5는 부식에 의한 휘스커 성장기구를 나타낸 것으로 고온고습 환경에서도 휘스커가 성장된다고 알려져 있다¹³⁾. 고온 고습으로 주석도금층은 부식되며 주석도금층에 발생한 산화물(SnO_x)은 29~47% 까지 부피가 팽창한다. 이 부피 팽창이 주석도금층에 압축응력을 유발함으로써 휘스커가 성장된다고 보고되고 있다^{12,13)}. 고온고습 환경에서 생성되는 휘스커 성장은 도금 두께, 리플로우 횟수, 부식 정도에 따라 다르기 때문에 휘스커 가속은 예측하기 어렵다. 그러나 Osenbach¹⁵⁾ 등은 고온고습 조건에서 휘스커 성장을 가속하기 위한 최적 환경조건은 60°C, 87% R.H. 으로 제시하기도 하였다.

이 밖에도 도금 조건에 따른 휘스커 성장¹⁶⁾, 굽힘(bending)에 의한 휘스커 성장^{17,18)} 등이 보고되고 있다. 그러나, 고온고습 환경과 온도 사이클 환경에서 발생한 휘스커 성장속도 차이^{19,20)}, 진공환경에서의 휘스커 성장기구, 산화물층 두께에 따른 휘스커 성장기구, Pb, Bi 등의 첨가물에 따른 휘스커 성장기구^{9,21)} 등은 아직까지 명확하게 규명을 하지 못하고 있는 실정이다. 현재까지 휘스커 성장기구는 많은 연구자들에 의해 밝혀졌지만, 현재까지도 연구가 진행되고 있는 실정이다^{8,10,11,15)}. 이러한 연구결과는 궁극적으로 휘스커 발생

및 성장길이를 예측할 수 있으며, 휘스커를 억제할 수 있는 기술을 도출할 것으로 사료된다.

3.2 휘스커 평가방법

Table 1과 같이 휘스커를 평가하는 시험방법은 IPC (Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits)²²⁾, JEDEC(Joint Electron Device Engineering Council)^{23,24)}, JEITA(Japan Electronics and Information Technology Industries Association)^{25,26)} 에 따라 정리하였다. 특히 JEDEC²⁴⁾에서는 자동차, 네트워크 장비는 Class 2, 산업용 장비는 Class 1으로 분류하여 일반 소비재인 Class 1A보다 더 많은 시험시간을 요구하고 있다.

세 기준은 공통적으로 상온유지시험, 고온고습시험, 온도사이클시험을 포함하고 있으며 총 시험시간도 비슷하다. 상온유지시험은 도금 및 확산에 의한 내부응력과 관련된 휘스커를 평가하기 위해 진행한다. 고온고습시험은 상온 환경을 가속하기 위해 제안되었으나 최근에는 휘스커의 다른 성장기구인 산화물층과 관련된 휘스커를 평가하기 위해 진행한다. 온도사이클시험은 주석도금층과 모재와의 열팽창 계수에 의한 응력과 관련된 휘스커를 평가하기 위해 진행한다.

휘스커 평가에 대한 목적은 필드 환경에서 일어날 수 있는 휘스커 성장을 가속시켜 전자 제품에서 발생하는 휘스커 위험관리를 하는데 있다. 그러나 상온유지시험은 필드 환경과 유사하나 시간 가속성이 없으며, 고온고습시험은 산화와 관련된 휘스커 성장에는 관련이 있으나 산화층 두께와 휘스커 성장과의 상관관계 및 휘스커 성장에 대한 고온고습시험 시간과 필드 시간과의 상관관계도 규명되지 않았다. 온도사이클시험인 경우에도 최고, 최저 온도의 유지시간 및 사이클에 따른 휘스커 성장과의 상관관계도 규명되지 않은 실정이다. 따라서 현재까지 제안된 휘스커 시험방법은 휘스커에 대한 필드 가속성에 한계가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 JEDEC²⁴⁾에서 제시한 휘스커 길이에 대한 측정방법으로 휘스커 길이는 휘스커가 발생한 곳에서부터 최대 길이를 측정한다. 그러나, 휘스커는 3차원 공간으로 성장하여 광학 현미경 및 주사전자현미경으로 최대 길이를 측정하는데 한계를 가지고 있다.

JEDEC^{23,24)}에서는 각 부품 종류에 따라 Fig. 7과 같이 휘스커 관찰영역을 제안하였다. 리드가 있는 부품은 리드별 7개 영역을, 리드가 없는 부품은 부품별 8개 영역을 분석한다. 시험 항목별로 리드가 있는 부품은 96개 리드, 리드가 없는 부품은 18개 도금영역에 대해 휘스커를 분석한다. 또한, 전처리(precondition) 조건

Table 1 Standards for environmental tests to assess tin whisker growth²⁷⁾

Standard	IEC60068-82-2	JESD22A121A	JESD201	ET-7410	RC-5241
Issued date	2007/05	2008/07	2006/03	2005/12	2007/09
Preconditioning	Soldering simulation Lead forming	Reflow Lead forming	Reflow Lead forming	Lead forming	-
Ambient Storage	30°C/60% 25°C/55% 4000 hours	30°C/60%	30°C/60% 4000 hours (Class 1, 2) 1000 hours (Class 1A)	30°C/60% 4000 hours	-
High Temperature & humidity test	55°C/80% 2000 hours	55°C/85%	55°C/85% 4000 hours (Class 1, 2) 1000 hours (Class 1A)	55°C/85% 2000 hours	-
Temperature Cycling	Min:-55 or 40°C Max:85 or 125°C 1000 or 2000 cycles	Min:-55 or 40°C Max: 85°C	Min:-55 or 40°C Max:85 or 125°C 1500 cycles (Class 1, 2) 1000 cycle (Class 1A)	Min:-40°C Max:85°C 1000 cycles	-
Mechanical Stress	-	-	-	-	25°C/50%
Acceptance criteria	≥ 50 μm (Annex D)	-	≥40/45 μm (Class 2) ≥50/100 μm (Class 1) ≥20/75 μm (Class 1A)	-	-

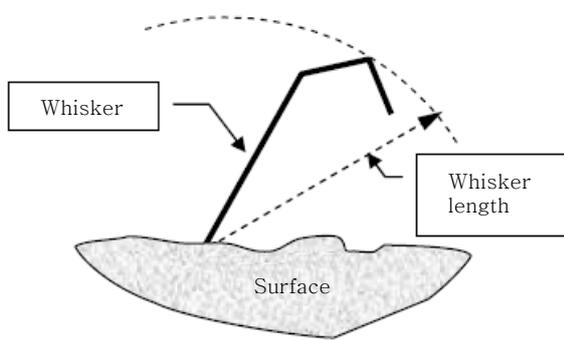


Fig. 6 Tin whisker measurement²⁴⁾

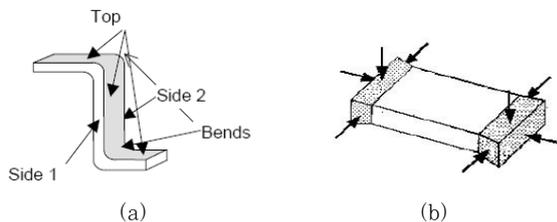


Fig. 7 Schematic drawing for detailed inspection of Tin whisker²³⁾ : (a) component with leads and (b) leadless components

에 따라 시료수는 늘어나서 휘스커를 평가하는 시료는 리드가 있는 부품인 경우에는 288 리드를 분석한다. 이 경우, 한 종류의 시험항목에 대해 2,016 영역을 분

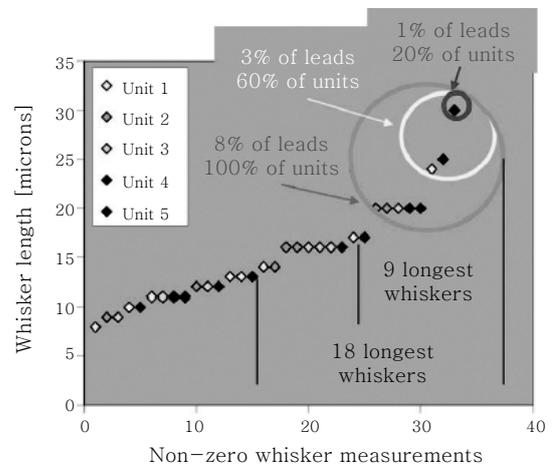


Fig. 8 Schematic drawing for detailed inspection of Tin whisker²⁰⁾

석하게 되어 있어 휘스커 평가방법에 대한 현실적인 시료수 및 리드별 분석영역을 개발할 필요가 있다. Valeska Schroeder²⁰⁾ 등은 Fig. 8과 같이 휘스커가 나타난 리드에 대해 휘스커 길이 분포를 분석한 결과, JEDEC^{23,24)}에서 제시한 96 lead 수는 적절한 수준으로 제안하였으며 실제적인 최대 휘스커 길이를 분석하기 위해서는 많은 리드의 관찰이 필요한 것으로 보고하였다. 따라서 휘스커 평가방법 개발시, 분석하고자 하는 리드 수의 감소보다는 리드내 분석영역을 최소화하

는 것이 적절한 것으로 판단된다.

마지막으로, 휘스커 분석시 IPC²²⁾, JEDEC^{23,24)}, JEITA^{25,26)}에서는 최대 휘스커 길이에 대해서만 기록하게 되어 있으나, 전자 부품의 휘스커 경향성을 알기 위해서는 휘스커 밀도가 고려되어야 한다.

4. 휘스커 억제방안

4.1 부품도금 및 공정

휘스커를 억제하기 위해서 많은 연구들은 휘스커 성장기구를 억제하는 방향으로 억제기술을 보고하였다^{9,21,29-33)}. 일반적으로는 주석 도금 변경, 열처리, 결정립 미세화 등으로 주로 구리와 주석의 Cu₆Sn₅ 성장 억제를 통해 주석도금층 내부응력을 감소시켜 휘스커 성장을 억제한다.

주석 도금 변경은 주석도금처리 대신에 니켈팔라듐(Ni/Pd), 니켈팔라듐골드(Ni/Pd/Au) 도금처리를 하거나, Sn-Bi²¹⁾, Sn-Ag 와 같이 주석합금층을 도금하는 방법들이 이용된다. 또한 모재와 주석도금층 사이에 하지도금층(Underlayer)²⁹⁻³¹⁾을 도금하는 방법도 많이 적용되고 있다. Ni/Pd 도금처리는 도금층내 주석이 포함되지 않아 휘스커에 안정하며, 하지도금층(Underlayer)은 니켈(Ni)인 경우 최소 0.5 μm 이상인 경우에 니켈과 주석간 금속간화합물(Ni₃Sn₄) 성장 및 니켈 도금층의 구리 원자와 주석원자간 확산 방지가 휘스커 성장을 억제한다고 보고되었다³¹⁾.

Fig. 9는 열처리에 의한 휘스커 억제효과를 나타낸 것으로 고온환경에 의한 Cu₃Sn 성장, 평판 구조의 금속간화합물 성장, 시효에 의한 도금층 내부응력 감소 등으로 휘스커 성장을 억제시킨다^{32,33)}. 일반적으로 열처리 조건은 주석 도금한 후 150°C에서 1시간으로 알려져 있다^{9,32,33)}.

주석층 합금화를 통해 도금층 결정립을 미세화하여 휘스커 억제를 유발하기도 한다. Sn-Bi 합금인 경우 Bi 함량은 2~4%, Sn-Ag 합금인 경우 Ag 함량은 2~4%가 적절한 것으로 보고⁹⁾되고 있다.

iNEMI(International Electronics Manufacturing Initiative)는 휘스커 억제기술과 관련하여 Table. 2와 같이 제시하였다³⁴⁾. 도금조건 변경 및 열처리 적용을 통해 휘스커 억제는 가능하나 휘스커 평가는 필요한 것으로 보고³⁴⁾된 것으로 보아 각 억제기술에 따른 휘스커 억제효과는 아직까지 적절하지 못한 것으로 판단된다.

iNEMI에서 제안된 휘스커 억제기술은 구리와 주석의 Cu₆Sn₅ 성장 억제에 의한 휘스커 성장 억제로써,

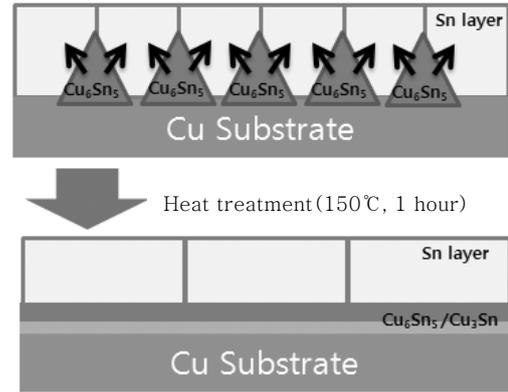


Fig. 9 Schematic drawing for the Sn/Cu microstructure variation with heat treatment⁹⁾

Table 2 Surface finish for whisker mitigation³⁴⁾

Category	Surface Finish
No whisker test required	NiPdAu, NiPd, NiAu
Pass whisker test	Hot dipped SnAgCu Matte Sn with Ni layer Reflowed Sn Matte Sn with Ag layer Hot Dipped SnAg Hot Dipped SnCu Hot Dipped Sn SnAg(1.5 - 4% Ag) Matte Sn -150°Canneal SnBi(2 - 4% Bi)
Do not accept finish	Matte SnCu -150°Canneal Bright Tin with Ni layer Matte Sn, Semi-Matte Sn SnCu, Bright Sn

주석 산화층 형성에 의한 휘스커 성장은 제어하지 못하는 것으로 사료된다. Fig. 10과 같이, 고온고습 환경에서는 열처리한 부품에서 휘스커가 더 길게 성장한 것으로 보고²⁰⁾되고 있으며 일부 연구에서는 주석 산화층 형성에 의한 휘스커 성장은 니켈층의 하지 도금처리 및 FeNi42 합금처리와 관계없이 일어난다고 보고하고 있다¹³⁾. 또한, iNEMI에서 제시하는 휘스커 성장 억제기술은 부품 실장후 무연 솔더에서 성장하는 휘스커 성장은 억제하지 못하는 것으로 사료된다.

4.2 컨포멀 코팅(conformal coating)

휘스커를 억제하기 위해 DoD(Department of Defence), NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서는 컨포멀 코팅(conformal coating)을 제안하고 있다¹⁰⁾. Fig. 11은 컨포멀 코팅(conformal

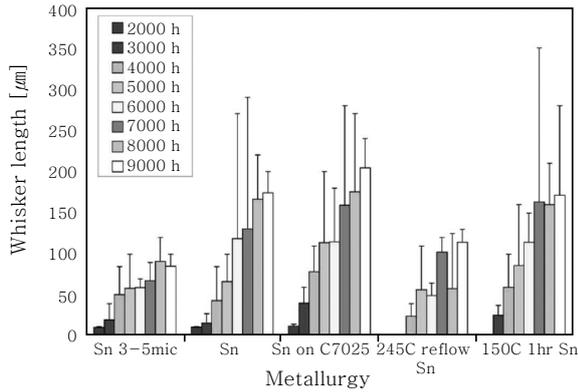


Fig. 10 Whisker growth over time for various surface finishes exposed to 60°C/93% environmental condition²⁰⁾

coating)에 의해 휘스커 성장이 억제되는 것을 보여준다. 또한 휘스커가 컨포멀 코팅(conformal coating)을 뚫고 성장하여도 부품 리드가 컨포멀 코팅(conformal coating)에 의해 절연되어 전기적 단락이 발생할 수 있는 가능성이 현저히 낮아진다.

컨포멀 코팅(conformal coating)은 전자부품이 실장된 회로기판 위에 얇은 고분자 재질을 도포한 것으로 자동차, 의료, 항공, 우주 분야 등 주로 높은 신뢰성이 요구되는 분야에 사용된다. 컨포멀 코팅(conformal coating)은 일반적으로 25 ~ 200 µm 두께로 디핑, 브러쉬, 스프레이, 디스펜싱 등의 공정을 이용하여 도포된다. 주로 아크릴(acrylic), 실리콘(silicone), 우레탄(urethane), 파릴렌(parylene) 계열이 사용되며 각 코팅 재질에 따른 장, 단점은 Table. 3에 나타내었다.

Boeing³⁶⁾, NASA³⁷⁾ 등에서는 현재 각 코팅 종류에 휘스커 억제 경향성을 연구하고 있다. Boeing 등에 따르면 실리콘, 우레탄이 휘스커 억제에 효과적인 것으로 보고되고 있으며³⁶⁾, NASA에서는 Fig. 12과 같이 50 µm

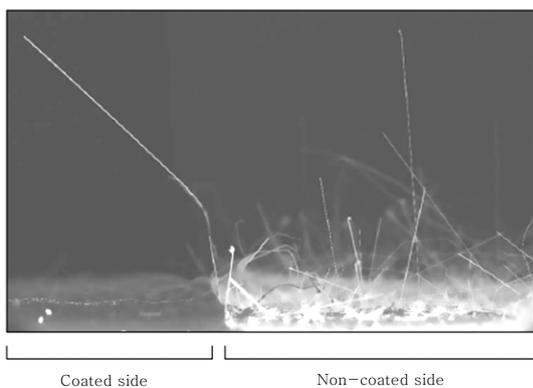


Fig. 11 The containment of tin whiskers by conformal coating⁸⁾

Table 3 Advantage and disadvantage comparison of conformal coating material³⁵⁾

Coating	Strength	Weakness
Acrylic	<ul style="list-style-type: none"> · Ease of rework · Simple drying · Good moisture resistance 	<ul style="list-style-type: none"> · High VOC · Viscosity variation · Flammability
Silicone	<ul style="list-style-type: none"> · Stable (-40 ~ 200°C) · Flexibility · Good moisture resistance 	<ul style="list-style-type: none"> · Short pot life · Require humidity to cure · Low abrasion resistance
Urethane	<ul style="list-style-type: none"> · Good moisture resistance · Good dielectric properties · Solvent resistance 	<ul style="list-style-type: none"> · Moisture affects cure · Health and safety concern · Long cure time
Parylene	<ul style="list-style-type: none"> · Excellent uniformity · Low permeability · Low environmental impact process 	<ul style="list-style-type: none"> · Masking required · Require vacuum chamber · Limited UV resistance

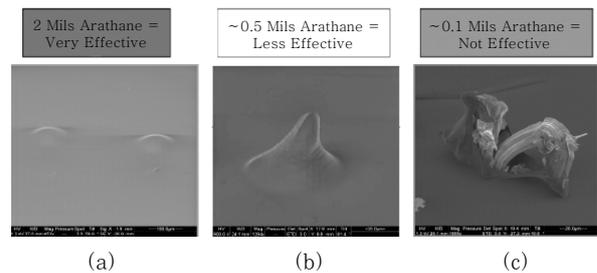


Fig. 12 The effect on whisker mitigation with various thickness of conformal coating³⁷⁾ : (a) 2 mils thickness, (b) 0.5 mils thickness and (c) 0.1 mils thickness

이상 두께를 가진 우레탄 코팅에서는 11년 동안 휘스커가 관찰되지 않는다고 보고하고 있다³⁷⁾.

따라서, 높은 신뢰성이 요구되는 국방 및 우주분야에서 주석 휘스커를 억제하기 위해서는 컨포멀 코팅(conformal coating)이 가장 효과적인 것으로 사료되며, 국내에서도 컨포멀 코팅(conformal coating)에 대한 휘스커 억제 기술 개발 연구가 서둘러 진행되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

주석 휘스커는 주석층의 내부응력으로 인해 발생하며 내부응력은 열팽창 계수 차이, Sn-Cu 금속간화합물의 입계 성장, 표면층의 산화, 기계적인 굽힘 등에 기인한

다. 이러한 휘스커 성장기구 차이에 따라 휘스커 평가 방법이 달라졌으며 아직까지 필드 시간과의 가속 상관 관계는 규명되지 않고 있다. 또한, 휘스커 관찰방법 및 시료 수 등에 보다 합리적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

휘스커를 억제하기 위해 iNEMI, JEDEC 등에서 많은 억제방안들을 제시하고 있으나 휘스커를 경감시킬 뿐, 오랜 기간 동안 휘스커 억제에는 한계를 가지고 있는 것으로 판단된다. 따라서, 높은 신뢰성이 요구되는 국방 및 우주 분야에서는 휘스커를 억제하기 위해 컨포멀 코팅(conformal coating)이 적용되고 있으며 컨포멀 코팅(conformal coating) 재료에 따른 휘스커 성장 모델 개발 및 필드 자료를 분석하고 있다. 따라서, 국내에서도 국방 및 우주 분야의 무연화를 추진하기 위해서는 휘스커 억제 기술개발이 진행되어야 할 것이다. 특히, 컨포멀 코팅(conformal coating) 재료에 따른 휘스커 성장 억제 기술개발을 서둘러야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council, Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment : The european parliament and the council fo the european union, 2003
- Moon-II Kim, Kyu-Sik Shin, Jae-Pil Jung : Research Trends of Sn-Ag Based Pb-Free Solders, Journal of KWJS, **19-1** (2001), 15-20 (in Korean)
- Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council, end-of life vehicles : The european parliament and the council fo the european union, 2000
- Sang-Su Ha, Jong-Woong Kim, Jong-Hyuck Chae, Won-Chul Moon, Tae-Hwan Hong, Choong-Sik Yoo, Jeong-Hoon Moon, Seung-Boo Jung : Thermo-Mechanical Reliability of Lead-Free Surface Mount Assemblies for Auto-Mobile Application, Journal of KWJS, **24-6** (2006), 457-463 (in Korean)
- Chang-Bae Lee, Chang-Youl Lee, Chang-Chae Shur, Seung-Boo Jung : The Growth Kinetics of Intermetallic Compound Layer in Lead-Free Solder Joints, Journal of KWJS, **20-3** (2006), 272-279 (in Korean)
- Jai-Hyun Park, Jong-Hyun Lee, Yong-Sik Ahn : Standardization of Mechanical Test Method for Lead-Free Solder Paste, Journal of KWJS, **25-2** (2007), 139-144 (in Korean)
- S.J. Meschter : Lead-free research activities and gaps for military and aerospace systems, SERDP 2010 Partners in Environmental Technology Technical Symposium&Workshop, 2010
- Carmine Meola : Pb-free Electronics Research Manhattan Project - Phase I, ACI Technology Inc., 2009
- JP002 : Current Tin Whiskers Theory and Mitigation Practices Guideline, JP002, JEDEC/IPC Joint Publication, 2006
- Jay Brusse, Henning Leidecker, Lyudmyla Panashchenko : Metal Whiskers-Failure Modes and Mitigation Strategies, <http://nepp.nasa.gov/whisker/>, 2007
- Carmine Meola : Pb-free Electronics Research Manhattan Project - Phase II: ACI Technology, Inc., 2010
- Joe Smetana : Theory of Tin Whisker Growth: "The End Game", IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **30-1** (2007), 11-22
- Pascal Oberdorff, Marc Dittes, Paolo Crema, Peng Su, and Elton Yu : Humidity Effects on Sn Whisker Formation, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **29-4** (2006), 239-245
- Ichizo Sakamoto : Whisker Test Methods of JEITA Whisker Growth Mechanism for Test Methods, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **28-1** (2005), 10-16
- John W. Osenbach, Heidi L. Reynolds, Gregory Henshall, Richard Dixon Parker, and Peng Su : Tin Whisker Test Development - Temperature and Humidity Effects Part II: Acceleration Model Development, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **33-1** (2010), 16-24
- Sudarshan Lal and Thomas D. Moyer : Role of Intrinsic Stresses in the Phenomena of Tin Whiskers in Electrical Connectors, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **28-1** (2005), 63-74
- Tadahiro Shibutani and Qiang Yu : Pressure Induced Tin Whisker Formation on SnCu Finish by Nanoindentation Creep, 10th Electronics Packaging Technology Conference, 2008, 1442-1447
- Tadahiro Shibutani, Qiang Yu, Takuma Yamashita, and Masaki Shiratori : Stress-Induced Tin Whisker Initiation Under Contact Loading, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **29-4** (2006), 259-264
- Nick Vo, Mark Kwoka, and Peter Bush : Tin Whisker Test Standardization, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **28-1** (2006), 3-9
- Valeska Schroeder, Peter Bush, Maureen Williams, Nhat(Nick) Vo, and Heidi L. Reynolds : Tin Whisker Test Method Development, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **29-4** (2006), 231-238
- Kyung-Seob Kim, Chung-Hee Yu, Jun-Mo Yang: Behavior of Tin Whisker Formation and Growth on Lead-free Solder Finish, Thin Film Solid, **504** (2006), 350-354
- IEC60068-2-82 : Whisker Test Methods for Electronics and Electric Components, 2007

23. JESD22A121A : Test Method for Measuring Whisker Growth on Tin and Tin Alloy Surface Finishes, JEDEC/IPC Joint Publication, 2008
24. JESD201 : Environmental Acceptance Requirement for Tin Whisker Susceptibility of Tin and Tin Alloy Surface Finishes, JEDEC/IPC Joint Publication, 2006
25. ET-7410 : Whisker Test Methods on Components for Use in Electrical and Electronic Equipment, JEITA Standard, 2005
26. RC-5241 : Whisker Test Methods on Connectors for Use in Electrical and Electronic Equipment, JEITA Standard, 2007
27. Tadahiro Shibutani, Michael Osterman, and Michael Pecht: Standards for Tin Whisker Test Methods on Lead-free Components, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **32-1** (2009), 216-219
28. John W. Osenbach, Heidi L. Reynolds, Gregory Henshall, Richard Dixon Parker, and Peng Su : Tin Whisker Test Development - Temperature and Humidity Effects Part II: Acceleration Model Development, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **33-1** (2010), 16-24
29. Lyudmyla Panashchenko and Michael Osterman : Examination of Nickel Underlayer as a Tin Whisker Mitigator, Electronic Components and Technology Conference, 2009, 1037-1043
30. Jeffrey C.B. Lee, P.C. Chen, C.G.Tyan : The Sn Whisker Growth Evolution of IC Packaging on the PC Board Assembly, Electronic Components and Technology Conference, 2007, 1964-1970
31. J.W. Osenbach, R.L. Shook, B.T. Vaccaro, A. Amin, B.D. Potteiger, K.N. Hooghan, P. Suratkar, and P. Ruengsinsub : Tin Whisker Mitigation: Application of Post Mold Nickel Underplate on Copper Based Lead Frames and Effects of Board Assembly Reflow, Proceedings Surface Mount Technology Assoc., 2004, 724-73
32. Yuki Fukuda, Michael Osterman, Michael Pecht : The Effect of Annealing on Tin Whisker Growth, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **29-4** (2006), 252-258
33. John W. Osenbach, Richard L. Shook, Brian T. Vaccaro, Brian D. Potteiger, Ahmed N. Amin, K. N. Hooghan, P. Suratkar, and P. Ruengsinsub : Sn Whiskers: Material, Design, Processing, and Post-Plate Reflow Effects and Development of an Overall Phenomenological Theory, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, **28-1** (2005), 36-62
34. iNEMI Recommendations on Lead-Free Finishes for Components Used in High-Reliability Products : iNEMI, 2006
35. IPC-HDBK-830 : Guidelines for Design, Selection and Application of Conformal Coatings, 2002
36. Thomas A. Woodrow, Ph.D. and Eugene A. Ledbury: Evaluation of Conformal Coatings as a Tin Whisker Mitigation Strategy, Part II, SMTA International Conference, 2006, 24-28
37. Lyudmyla Panashchenko, Jay Brusse, Henning Leidecker: Long Term Investigation of Urethane Conformal Coating Against Tin Whisker Growth, <http://nepp.nasa.gov/whisker/>, 2010



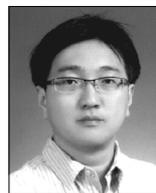
- 오철민
- 1976년생
- 전자부품연구원
- Solder Joint Integrity
- e-mail : cmoh@keti.re.kr



- 정재성
- 1975년생
- 전자부품연구원
- Solder Joint Integrity
- e-mail : jjseicp@keti.re.kr



- 구기영
- 1970년생
- 국방기술품질원
- Soldering Process
- e-mail : kiyoung89@korea.com



- 윤영호
- 1973년생
- 국방기술품질원
- Soldering Process
- e-mail : uhii@naver.com



- 황운희
- 1958년생
- 국방기술품질원
- Solder Joint Reliability
- e-mail : uhhwang@chol.com



- 홍원식
- 1968년생
- 전자부품연구원
- Pb-free Solder, Life Prediction
- e-mail : wshong@keti.re.kr