

PCB에서의 ECM 특성에 미치는 SnPb 솔더 합금의 분극거동의 영향

이신복¹ · 유영란² · 정자영^{2*} · 박영배^{2*} · 김영식² · 주영창¹

¹서울대학교 재료공학부, ²안동대학교 신소재공학부

Influence of Polarization Behaviors on the ECM Characteristics of SnPb Solder Alloys in PCB

Shin-Bok Lee¹, Young-Ran Yoo², Ja-Young Jung², Young-Bae Park^{2*}
Young-Sik Kim², and Young-Chang Joo¹

¹School of Materials Science and Engineering, Seoul National University,
Seoul 151-744 Korea

²School of Advanced Materials Engineering, Andong National University, 388,
Songchun, Andong, 760-749, Korea

초 록: 전자 부품의 크기가 점점 줄어들고 고집적화됨에 따라 전자 패키지 내부에 사용되는 금속간 간격이 줄어들고 있다. 이에 더하여 고온 고습한 환경에서 금속간에 전압이 인가되면 금속의 이온화가 촉진, 금속으로 이루어진 필라멘트가 형성되어 결국 절연파괴에 이르게 된다. 이러한 현상이 electrochemical migration(ECM)이다. 이에 인쇄회로기판을 사용하여 ECM 특성 평가를 수행하였다. 항온/항습조건(85°C, 85%RH)에서 PCB의 300 μm 의 단자간격을 가진 through-hole via 표면에서 발생하는 ECM 현상은 CAF가 절연파괴의 주된 메커니즘이었다. solder를 구성하는 Sn과 Pb 조성 분석을 통해 Pb의 이온 이동도가 Sn의 이온 이동도보다 큰 것을 알 수 있었으며 이는 급격한 양극용해 거동을 보이는 pure Pb의 분극거동과 상관관계가 있는 것으로 사료된다. 또한 시간에 따른 절연파괴시간 시험을 통하여 ECM에 의한 절연파괴시간이 인가전압에 의존하며 인가전압 의존성 지수값(n)은 2로 나타났다.

Abstract: Smaller size and higher integration of electronic components make smaller gap between metal conducting layers in electronic package. Under harsh environmental conditions (high temperature/humidity), electronic component respond to applied voltages by electrochemically ionization of metal and metal filament formation, which lead to short failure and this phenomenon is termed electrochemical migration(ECM). In this work, printed circuit board(PCB) is used for determination of ECM characteristics. Copper leads of PCB are soldered by eutectic solder alloys. Insulation breakdown time is measured at 85°C/85% RH. CAF is the main mechanism of ECM at PCB. Pb is more susceptible to CAF rather than Sn, which corresponds well to the corrosion resistance of solder materials in aqueous environment. Polarization tests in chloride or chloride-free solutions for pure metal and eutectic solder alloys are performed to understand ECM characteristics. Lifetime results show well defined log-normal distribution which resulted in biased voltage factor(n=2) by voltage scaling. Details on migration mechanism and lifetime statistics will be presented and discussed.

Keywords: electrochemical migration(ECM), PCB, CAF, solder, anodic polarization

*Corresponding author
E-mail: ybpark@andong.ac.kr

1. 서 론

Ag나 Cu 등의 migration이라는 것은, 금속박, 금속 도금, 콜로이드 금속이나 금속도전도료 등이 전류·전압의 존재 하에서 여러 가지의 절연 재료와 접하고 있는 경우, 건조한 금속의 내부에서 전자의 흐름에 의해 금속의 원자가 이동하는 현상, 또는 절연 재료의 흡습 또는 물의 흡착에 수반하여 금속이 그러한 표면 또는 내부로 이동하는 현상을 말한다. 이 현상에 의하면, 최종적인 모습은 배선의 전기 전도도 감소에 의한 불량 및 절연 불량에 의한 고장을 초래할 수 있다. 그래서 전자 부품의 소형화됨에 따라 고밀도 배선이 진행됨에 있어서, 전극간 거리의 감소와 동시에, migration 현상에 의한 성능 저하나 고장이 중요한 문제가 되고 있다.

이러한 현상 중 절연 불량외의 경우, 1955년 Kohan 등에 의해 전화 교환기의 보드에 발생한 Ag의 migration 현상이 처음으로 보고되었으며, migration의 발생에는 전기장과 수분이 필요하고 전기 화학적인 현상에 의해 발생된다고 보고되었다. 특히 단시간, 매우 낮은 전계에서 발생하는 경우도 있다. 그 이후에, Ag 이외의 Cu, Sn, Au 등의 금속에서도 같은 현상이 일어난다는 것도 보고되었다.

금속의 migration 현상은 전기장의 유무에 따라 electro-migration과 creepage로 나뉘어 질 수 있다. 전자는 전기장의 영향으로, 금속 성분이 비금속 매체 위나 안을 가로질러 이동하는 현상이다. electro-migration 현상에는, 이동의 전후로 금속 성분이 금속 상태이며 도전성을 나타낸다. 이에 대해서, 후자인 creepage 현상은 금속의 부식에 의해 형성된 부식성 생성물이 얼룩처럼 보이는 현상이다. 그러나 부식성 생성물은 그 발생 상황이 electro-migration과 유사(예를 들면 덴드라이트)하다. 2종류의 migration의 큰 차이점은 전기장의 유무이다. 부식성 생성물은 전기장이 없어도 발생하지만, electro-migration은 전기장이 없으면 발생하지 않는다.

현상의 차이에 의해 electro-migration은 2종류로 나뉘어진다. 하나는 건조한 금속 내부에서 전자의 이동에 의한 금속 원자의 이동으로 발생하는 electro-migration(협의의 electro-migration)이고, 다

른 하나는 전기장 현상에 의한 electrochemical migration(ECM)이다. 특히, ECM은 눈으로 보이는 수분이 존재하게 되는 경우(wet migration)와 보이지 않는 수분이 존재하는 경우(humid migration : 응축된 상태)로 분류된다. humid ECM은 필드 조건에 가까워서, ECM의 발생에는 장시간(약 수 백 시간)을 필요로 하지만, wet ECM에는 저전위(수 V)에서도 수초 내에 발생한다.

최근 들어 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB) 및 칩 패키지(Chip Package)의 신뢰성에 대한 관심이 높아지고 있다. 전자부품의 소형화와 고집적화에 따라 PCB 및 electronic package의 금속 단자간의 간격이 점점 줄게 되어, 금속 단자간 연결에 의한 절연 파괴현상에 쉽게 노출되게 되었다. 이는 금속 단자가 고온/다습의 가혹한 환경에 노출된 상태에서 전압이 인가됨에 따라 전기화학적으로 불안정해지기 때문이다¹⁾. 이러한 가혹조건에서, 인가된 전압에 의해 전자 부품의 금속 단자는 전기화학적으로 이온화되게 되며 양극과 음극 사이의 절연체상에 전도성 필라멘트를 형성한다²⁾. 이는 전자부품의 절연 파괴를 초래하게 되는데 이러한 현상이 대표적인 ECM중의 하나이다^{3,4,5,6,7)}. ECM 현상은 크게 나누어 두 가지 메커니즘을 통해 일어나게 되는데, 하나는 Conductive anodic filament(CAF)^{8,9)} 이고 다른 하나는 dendritic growth¹⁰⁾ 이다. CAF의 경우, 가해진 전기장에 의해 양극의 금속이 이온화되고 migration 하여 양극에서 음극으로 필라멘트를 형성, 절연파괴에 이르게 된다. 그러나 dendritic growth는 양극에서 이온화된 금속이 전기장을 따라 음극쪽으로 이동, 음극상에 환원되어 수지상의 필라멘트를 형성하게 되며, 이렇게 형성된 필라멘트가 양극까지 성장하여 절연파괴에 이르는 메커니즘이다³⁾. 이 두 가지가 ECM을 일으키는 주된 메커니즘이며, 전자부품, 특히 electronic package와 PCB에서 전기적 고장을 일으키는 주요 메커니즘이다.

따라서 본 연구에서는 ECM 현상의 재현 및 분석을 효과적으로 할 수 있는 실험 장치를 제작한 후, 실제 사용되는 인쇄회로기판에 대한 ECM 실험을 통해 현장적인 접근을 함과 동시에 eutectic SnPb, Sn, Pb soldering 재료에 대해 분극실험을 통해 금속의 ECM 현상에 대한 기구를 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

PCB¹¹⁾상에서 필라멘트의 형성으로 일어나는 절연파괴 경로는 크게 4가지로 나누어진다. Through-hole to through-hole, line to line, through-hole to line, layer to layer가 그 경로이다³⁾. 이중 가장 쉽게 절연파괴가 이루어질 수 있는 경로는 기판표면의 through-hole to through-hole 이다. 이에 4층 구조의 PCB기판을 사용하여, Cu 도금 과정을 통해 기판 표면에 형성된 700 μm pitch (단자간 간격: 300 μm)의 기판관통비아(through-hole via) (Fig. 1)사이의 ECM 절연파괴 특성 분석을 수행하였다. 실제로 기판위에 부품이 실장 되었을 때와 같은 조건을 만들어 주기 위해 기판의 Cu 단자는 eutectic SnPb로 솔더링 처리하였다. 저항 변화를 분석하기 위해 직류 전압을 인가한 후 전류 값을 측정하였으며, 85°C, 85%RH(Relative Humidity) 환경에서 시간에 따른 절연 파괴를 75~100V 직류 전압조건에서 측정하였다. 또한 통계처리를 위해 스위치 모듈을 사용하여 40개 시편의 저항 감소를 실시간으로 동시에 모니터링 하였다.(Fig. 2) 광학현미경, Field emission scanning electron microscope(FE-SEM), Energy-dispersive X-ray spectroscopy(EDS)를 사용하여 표면 관찰 및 조성 분석을 수행하였다.

ECM 현상은 양극에서 일종의 금속의 부식¹²⁾ 현상과 유사한 거동을 보인다. 이에 솔더 합금을 구성하고 있는 재료의 분극 특성을 평가하였다. 분

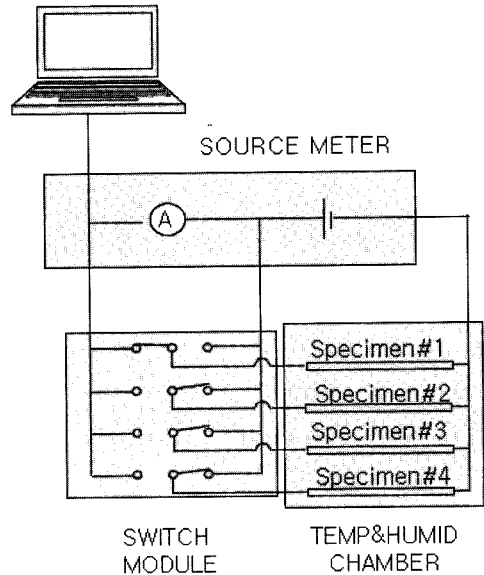


Fig. 2. Test system for high temperature/humidity test with 40ch switch-module.

극실험용 시편은 유리 기판 위에 UBM으로 사용할 Ni을 sputter를 이용하여 3000Å의 두께로 증착시키고, 그 위에 thermal evaporator를 사용하여 pure Sn, pure Pb를 1 μm의 두께로 증착하거나 Hot-plate를 사용하여 190°C에서 eutectic SnPb를 reflow하여 제작하였다. 절연피복된 lead wire를 제작된 시료에 연결한 후 0.25 cm²의 면적만이 시험 용액에 노출될 수 있도록 에폭시 수지로 scaling하

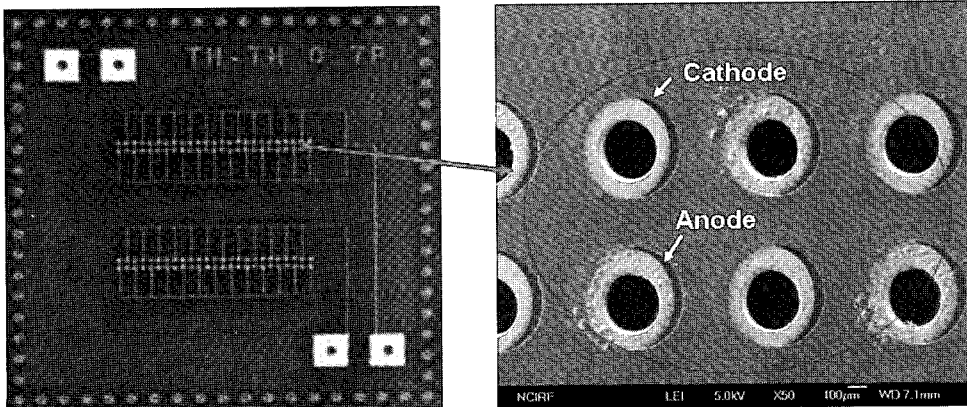


Fig. 1. Test specimen of PCB with 300 μm insulating distance; (a) PCB test board, (b) SEM image of test specimen (array of through-hole via)

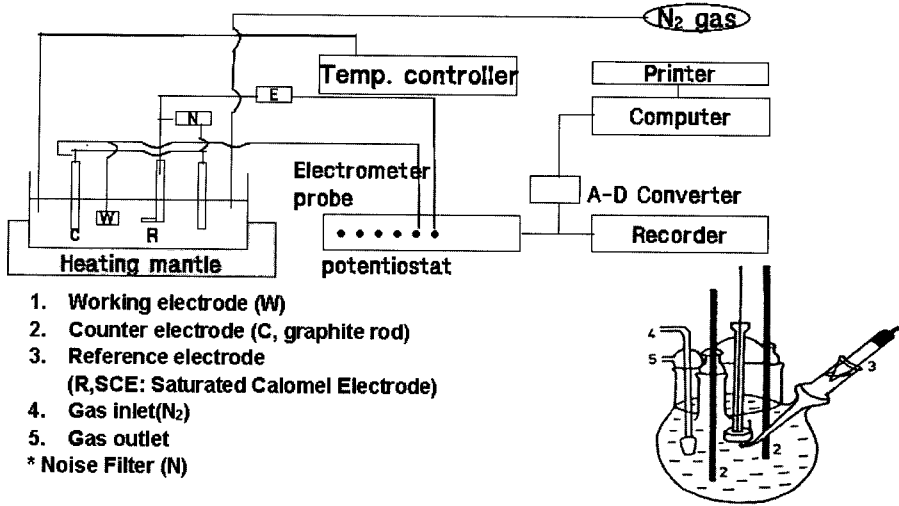


Fig. 3 Test system for polarization test.

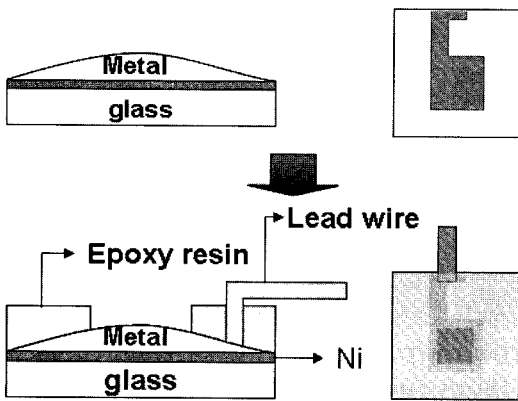


Fig. 4. Test specimen for polarization test of eutectic SnPb, Sn and Pb.

였다(Fig. 4). Potentiostat (Model Gamry, DC105)를 이용하였으며 사용한 보조 전극은 고밀도흑연봉을, 기준전극은 포화감홍전극(SCE, Saturated Calomel Electrode)을 사용하였다. 실험용액은 탈기한 0.001% NaCl 용액이었으며, 시험온도는 25 °C, 주사속도는 1 mV/sec이었다.

3. 결과 및 고찰

PCB 절연파괴를 일으키는 필라멘트의 주된 형성 메커니즘은 양극에서부터 발생하는 CAF (Conductive Anode Filament)임을 실험을 통해 확

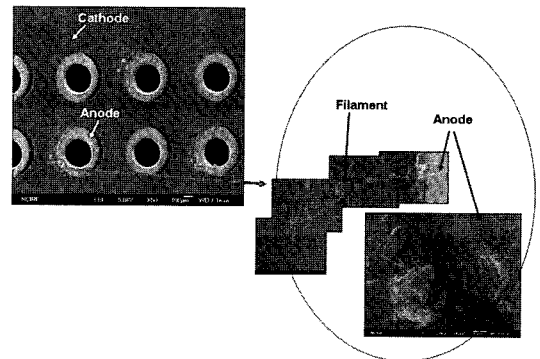


Fig. 5. Conductive anode filament formation around the anode of through-hole via in PCB.

인하였다. PCB 제조 공정에 사용되는 여러 가지 물질이 오염원으로 작용하여 양극 부근에서 금속 이온과 반응하여 CAF를 형성하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 5는 85°C, 85%RH의 조건에서 through-hole to through-hole 간에 100V의 정전압을 140시간 인가한 후의 시편에 대하여 관찰한 SEM 사진이다. 여기에서 PCB의 절연파괴를 일으키는 CAF는 초기에 through-hole via의 양극에서부터 접촉하여 성장하는 것이 아니라 양극 주변에서 국부적인 아일랜드를 이루며 성장함을 알 수 있다. 이를 통해 PCB의 through-hole via 사이에서 발생하는 필라멘트는 음극에서부터 성장하는 일종의 도금 과정인

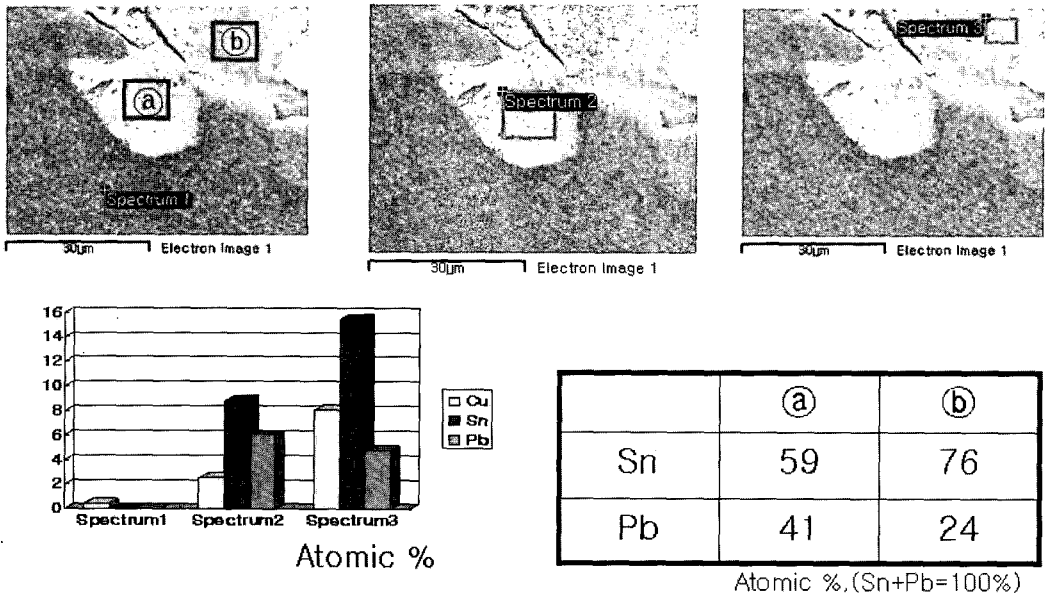


Fig. 6. Sn/Pb composition of the anode and CAF in PCB.

dendritic growth가 아니라 부식 과정을 통해 양극 및 양극 주변에서 발생하는 CAF 임을 확인하였다.

Fig. 6은 PCB의 절연파괴를 일으키는 CAF의 조성비를 EDS를 통하여 분석한 결과이다. PCB, CAF 및 soldering 부위에 대하여 CAF를 구성하는 주된 원소인 Cu, Sn, Pb의 조성비를 분석하였다. PCB 부위에서는 세 원소 모두 거의 나타나지 않고 있으며, CAF 및 soldering 부위로 갈수록 Cu의 성분이 증가함을 알 수 있다. 또한 상기의 순서로 위치가 이동함에 따라 Sn 및 Pb의 조성비도 변화되고 있다. solder의 주성분은 Sn, Pb이지만 Cu가 검출된 이유는 through-hole via에 도금된 Cu가 ECM 현상에 수반하여 Cu가 이온화되어 나타난 결과로 생각된다. 여기에서 solder의 구성성분인 Sn과 Pb의 비를 100%로 하여 CAF 및 soldering 부위에서의 조성비를 비교·분석해 보면, CAF(point A)부분의 Sn 비율은 양극(point B)보다 줄어드는 반면, Pb의 비율은 CAF(point A)에서 늘어나는 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 Pb의 이동도가 Sn의 이동도보다 더 크다는 것을 의미한다. 이에 더하여 단면 분석을 통해 PCB 표면 솔더층과 아래 구리층 계면에 형성된 Cu-Sn 금속간 화합물 층이 ECM거동 및 부식 거동에 미치는 영향이 없음을 확인하였다.

Fig. 7은 85°C, 85%RH의 항온항습 조건에서의 인가전압이 75V와 100V일 때, 시간의 변화에 따른 저항 변화 값을 측정된 결과이다. 파괴시간은 절연 저항이 초기 저항의 1%인 시점과 0.01%인 시점으로 정하였다. 그림 (a)는 인가전압이 75V인 경우 시간에 따른 저항 변화 값을 보여주고 있으며, (b)는 인가전압이 75V인 경우의 파괴시간과 누적고장율에 대한 log-normal 분포를 보여주고 있다. 그림에 의하면 절연 저항이 초기저항의 1% 이하로 된 경과시간을 ECM에 의한 파괴시간이라 할 경우에 시험 시편의 50%의 파괴가 일어나는 시간(t_{50})은 182.0시간으로 예측되었으며, 파괴시간을 절연저항이 초기저항의 0.01%이하로 된 경과시간으로 두었을 경우의 t_{50} 은 562.3시간으로 예측되었다. 그림 (c)는 인가전압이 100V인 경우 시간에 따른 저항 변화 값을 보여주고 있으며, (d)는 인가전압이 100V인 경우의 파괴시간과 누적고장율에 대한 log-normal 분포를 보여주고 있다. 절연저항이 초기저항의 1% 이하로 된 경과시간을 파괴시간으로 두었을 경우의 t_{50} 은 97.7시간으로 예측되었으며, 절연저항이 초기저항의 0.01%이하로 된 경과시간을 파괴시간으로 두었을 경우의 t_{50} 은 316.2시간으로 예측되었다. 인가전압이 증가할수록 파괴에 이르는 시간이 짧아짐을 알 수 있다. 이

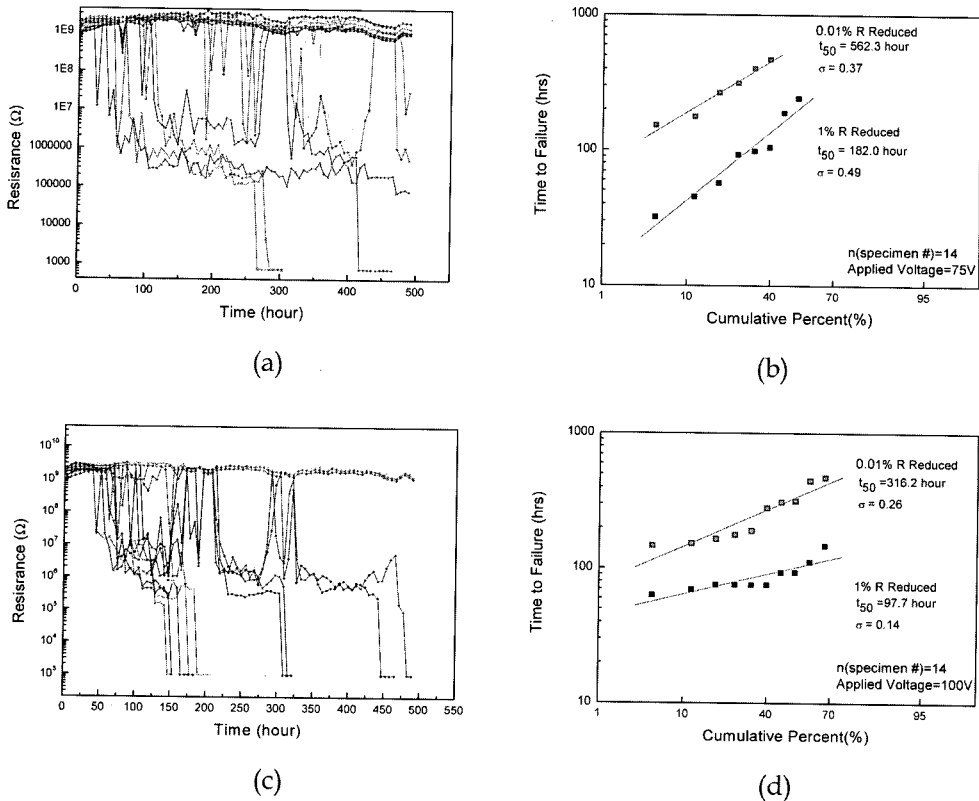


Fig. 7. In-situ resistance test and life time test; (a) 75V, 85°C, 85%RH resistance, (b) 75V, 85°C, 85%RH time to failure, (c)100V, 85°C, 85%RH resistance, (d)100V, 85°C, 85%RH time to failure.

러한 결과들로부터 PCB through-hole via의 ECM에 의한 파괴시간의 인가전압 의존성 지수(n=2)를 얻었다. 얻어진 결과는 Table 1에 나타내었다. 전자 부품에서 고장을 일으키는 현상중에 ECM외에 Electromigration이 있다. Electromigration의 경우 파괴 메커니즘에 따라 인가 전류 의존성 지수가 다르게 나타난다. void growth dominant의 경우에는 지수가 1, void nucleation dominant인 경우에는

지수가 2이다. 현재 ECM의 경우, 인가 전압 의존성 지수와 파괴 메커니즘간의 관계가 알려진 바가 없으며 이러한 상관관계를 파악하기 위해 연구를 진행하고 있다.

Fig. 8은 솔더 합금의 분극거동을 보여주고 있다. 분극조건은 탈기된 0.001% NaCl 수용액 중에서 1mV/sec의 속도로 분극을 행한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, pure Sn의 경우, 부식전위는 -790 mV(SCE)이고 음극분극에 의해 타펠거동을 보이다가 -1100mV(SCE) 부근의 전위 이하에서 다시 전류값이 크게 증가하고 있다. 한편 양극분극에 의해서 부동태 거동을 보이다가 -110mV(SCE)에서 공식이 발생하여 급격히 전류가 증가하고 있다. pure Pb의 경우, 부식전위는 -542mV(SCE)이고 음극분극에 의해 타펠거동을 보인 뒤 농도분극이 pure Sn보다 뚜렷하게 나타나며 -1100mV(SCE) 부근의 전위 이하에서 다시 전류값이 크게 증가하고 있다. 한편 양극분극에 의해서 부동태 거동이 나

Table 1. Biased voltage factor by voltage scaling

| | 1% | | 0.01% | | | |
|------|---------|------|-----------|---------|------|-----------|
| | T50(hr) | σ | # of fail | T50(hr) | σ | # of fail |
| 75V | 182 | 0.49 | 8 | 562 | 0.37 | 6 |
| 100V | 98 | 0.14 | 10 | 316 | 0.26 | 10 |

$$t_{50, 100V} = A \left(\frac{V_{75V}}{V_{100V}} \right)^n$$

n = 2.15(1% resistance reduced)
n = 2.00(0.01% resistance reduced)

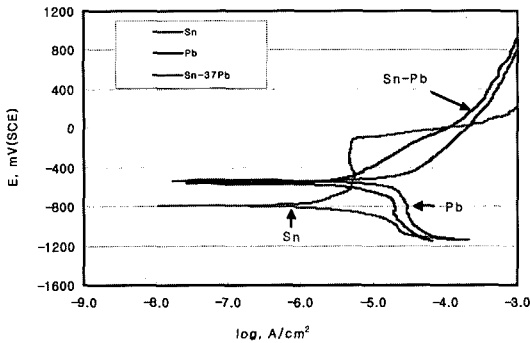


Fig. 8. Polarization curve of solder alloy and pure metals.

타나지 않고 급격한 양극용해 거동을 보이고 있다. eutectic SnPb의 경우, 부식전위는 -565mV(SCE) 이고 음극분극에 의해 타펠거동을 보인 뒤 농도분극이 pure Pb와 유사하게 나타나며 -1100mV(SCE) 부근의 전위 이하에서 다시 전류값이 크게 증가하고 있다. 한편 양극분극에 의해서 pure Sn의 부동태 거동과 pure Pb의 양극용해 거동의 중간 상태로 용해되고 있다.

Fig. 6의 CAF 현상에서 조성비를 살펴보면, soldering 부위보다 CAF 부위에서 Pb 검출량이 더 크게 나타났다. 이는 급격한 양극용해 거동을 보이는 pure Pb의 분극거동과 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

1) 항온/항습조건(85°C , $85\%RH$)에서 PCB의 $300\ \mu\text{m}$ 의 단자간격을 가진 through-hole via 표면에서 발생하는 ECM 현상은 dendritic growth가 아닌 CAF가 절연파괴의 주된 메커니즘이었고, 형성된 필라멘트 성분은 주로 Cu, Sn, Pb로 구성되어 있었다. 이중 solder를 구성하는 Sn과 Pb 조성 분석을 통해 Pb의 이온 이동도가 Sn의 이온 이동도보다 큰 것을 알 수 있었다. 한편, 시간에 따른 절연파괴시간 시험을 통하여 SnPb solder의 ECM에 의한 절연파괴시간이 인가전압에 의존하며 인가전압 의존성 지수값(n)이 2로 나타났다.

2) eutectic SnPb, pure Sn, pure Pb를 사용하여 분극거동을 살펴본 결과, pure Sn은 부동태 거동을 나타낸 반면, pure Pb는 급격한 양극용해거동을 보였다. 한편, eutectic SnPb는 두 거동의 중간상태로

용해되었으며 이러한 경향은 ECM 거동과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 전자부품신뢰성 설계 기술사업에 의하여 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. B. Rudra, D. Jennings, "Failure-mechanism models for conductive-filament formation", *IEEE Trans. Reliability*, 43(3), p354 (1994).
2. S. J. Krumbein, "Metallic electromigration phenomena", *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manufact. Technol.*, 11(1), pp.5-15 (1988).
3. W. J. Ready, L.J. Turbini, "The Effect of Flux Chemistry, Applied Voltage, Conductor Spacing, and Temperature on Conductive Anodic Filament Formation", *J. Electron. Mater.*, 31(11), pp.1208-1224 (2002).
4. H. Shitamoto, T. Nagatani, "The effect of migration in electrochemical deposition on a horizontal plate", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 31, pp.1137-1143 (1998).
5. G. Harsanyi, "Copper may destroy chip-level reliability: handle with care-mechanism and conditions for copper migrated resistive short formation" *IEEE Electron Device Letters*, 20(1), pp.5-8 (1999).
6. S. J. Krumbein, "Metallic electromigration phenomena", *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 11(1), pp.5-15 (1988).
7. G. Harsanyi, "Electrochemical processes resulting in migrated short failures in microcircuits", *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A*, 18(3), pp.602-610 (1995).
8. W. J. Ready, L. J. Turbini, S. R. Stock, B. A. Smith, "Conductive anodic filament enhancement in the presence of a polyglycol-containing flux [PWBS]", *IEEE International Reliability Physics Symposium*, 34th Annual Proceedings., pp.267-273 (1996).
9. B. Rudra, D. Jennings, "Failure-mechanism models for conductive-filament formation", *IEEE Transactions on Reliability*, 43(3), pp.354-360 (1994).
10. P. Yalamanchili, M. Al-Sheikhly, A. Christou, "Failure analysis of cathode filament formation in multilayer PWBS using combined electron spin resonance and micro-FTIR techniques", *IEEE International Reliability Physics Symposium*, 34th Annual

- Proceedings., pp.258-266 (1996).
11. A. Ku, K. Srihari and J. Dilella, "Process planning for manual PWB assembly", *Computers & Industrial Engineering*, 31(1-2), pp.181-184 (1996).
 12. O. Baradel, R. Nuttall, "Comparison of corrosion rates evaluated from polarisation resistance and electrochemical impedance spectroscopy measurements", *IEE Colloquium on Electrochemical Measurement*, Pages:8/1-8/10 (1994).