

금속 이온 마이그레이션의 해석적 방법

홍 원 식 · 정 승 부 · 김 광 배

Analysis Method of Metallic Ion Migration

Won-Sik Hong, Seung-Boo Jung and Kwang-Bae Kim

1. 서 론

유럽연합(EU), 일본 등 선진국을 중심으로 전자제품의 제조공정에 유해물질의 사용을 규제하는 환경규제가 본격화되고 있는 추세이다. 그 중 대표적인 것으로 EU의 특정유해물질관리지침(RoHS)이 2006년 7월부터 발효되며, 전자제품 내에 4종의 중금속인 납(Pb), 수은(Hg), 카드뮴(Cd), 6가크롬(Cr^{6+})과 2종의 난연제인 PBB, PBDE의 사용이 우선적으로 금지된다. 이에 따라 전자제품에 사용되는 모든 부품의 제조에는 6개 규제물질의 사용량을 엄격히 규제하게 되며, 특히 전자부품을 인쇄회로기판(PCB)에 실장 할 때 사용되는 솔더(solder)에도 납이 함유되지 않는 무연솔더(Pb-free solder)의 적용이 적극 추진되고 있는 실정이다. 그러나 전자부품이 고밀도 고집적화 됨에 따라 무연솔더의 적용으로 인해 기존에 발생하지 않는 여러 가지 문제점들이 발생되고 있다. 따라서 무연솔더를 적용하는 전자제품에 대한 신뢰성평가의 중요성은 매우 크게 부각되고 있다. 특히 무연솔더의 적용에 따라 소비자가 사용 중에 고장이 발생할 수 있는 금속 이온 마이그레이션(metallic ion migration)과 위스커(whisker)에 대한 문제가 심각히 대두되고 있는 실정이다. 그 중 금속 이온 마이그레이션 현상은 전자부품이 실장 되는 부분에 사용되는 솔더나 전기적 회로 간에 발생하여 전기적 단락(short)를 유발함으로써 전자제품의 치명적 고장을 유발 한다¹⁾. 이러한 마이그레이션 현상은 제품이 특정 환경 하에 일정 시간 노출되었을 경우 관찰될 수 있는 현상이다. 전기화학적 반응에 의해 발생하는 이온 마이그레이션 현상은 PCB 표면에 습기나 오염물질이 존재하고 전압이 인가된 상태에서 회로 상에 전도성 금속 수지상(dendrite) 형태의 필라멘트(filament)가 성장하는 현상이다. 전자제품에 새로운 재료인 무연 솔더가 사용됨에 따라 사용 환경에서의 이온 마이그레이션에 대한 새로운 평가가 이루어져야 한다. 따라서 이온 마이그레이

션에 대한 발생 메커니즘, 발생환경 그리고 신뢰성평가를 위한 시험방법에 대해 알아보고, 실제 시험한 결과를 바탕으로 도금재료에 따른 이온 마이그레이션 민감도에 대한 해석적 방법에 대해 소개하고자 한다.

2 금속 이온 마이그레이션 현상의 이론적 고찰

2.1 전기화학적 이온 마이그레이션의 정의

전기화학적 이온 마이그레이션은 PCB에 직류전압이 인가된 상태에서 회로 패턴 상에 전도성 금속 수지상 형태의 필라멘트가 성장하는 것을 말한다. 이온 마이그레이션 현상은 PCB의 외부표면, 내부 층간 계면 또는 페이퍼 페놀 적층판(paper phenolic laminate)의 복합재료 등에서 관찰되며, 수지상의 성장은 양극에서 용해된 금속이온을 포함한 용액으로부터 전기분해(electrodeposition)에 의해 성장한다. 그러나 금속부식에 의한 확산 및 이렉트로 마이그레이션(electromigration) 현상 등은 발생 메커니즘이 다르므로 본 지의 소개에서는 제외한다.

2.2 전기화학적 마이그레이션 현상의 2가지 특성

이온 마이그레이션 현상에는 크게 2가지로 구분할 수 있다. 하나는 PCB 등의 표면에 나타나는 표면 수지상의 형성과 다른 하나는 일명 CAF(conductive anodic filament)라고 말하는 전도성 양극 필라멘트 수지상의 형성이다. 그러나 이 두 가지는 발생 메커니즘에서 확연히 다르지만, 대다수 사람들은 이를 혼돈하여 사용하고 있다. 이 두 가지에 대해 좀 더 자세히 보면 다음과 같다.

2.2.1 표면 수지상의 형성

PCB 표면에 습기나 오염물질이 존재할 경우, 인가된

인가전압 하에서 음극에서 양극으로 형성, 성장한다. PCB 회로패턴의 재료가 SnPb 솔더 전도체인 경우 침상(tree-like dendrites, tin coated needles)의 Pb가 형성되며, 바이어스(bias)가 클 경우 양극과 음극 간에 브리지(bridge)가 형성되어 결과적으로 전기적 단락을 야기 시킨다. 형성된 필라멘트의 특성으로는 깨지기 쉬우며, 산화에 의해 파괴되고, 건조시 표면장력 변화 및 전류가 충분한 경우 연소(burn-out)현상도 발생된다. 수지상은 PCB 적층판 사이와 솔더 마스크(solder mask)의 계면 또는 컨포멀 코팅(conformal coating) 층에서 발생, 성장한다.

2.2.2 전도성 양극 필라멘트의 형성

전도성 양극 필라멘트는(conductive anodic filament : CAF)는 표면 수지상과 발생 메커니즘이 다른 형태로 마이그레이션이 발생하는 금속은 주석(Sn)이나 납(Pb)이 아니라 구리(Cu)이다. 필라멘트는 양극에서 음극으로 성장하며, 금속염(metallic salt)으로 구성되어 있다. CAF의 성장은 SnPb 솔더 밑에 있는 Cu base metal이 양극에서 생성되는 금속이온의 근원이다. 대부분의 양이온(anion)은 염소(Cl⁻)이온이며, 브로마이드 이온(bromide ion)이 SEM/EDX 분석에서 일부 검출된다. 또한 이온 오염에 의한 마이그레이션이 발생하기도 하는데 IC 패키지에 포함된 이온이나 초차 중에 포함된 인(P) 농도가 2%를 초과할 경우, Na, Cl 등이 포함된 경우, 솔더링 후 플럭스 제거를 위한 알콜류 사용시 세척이 충분하지 않은 경우 그리고 3염산, 3염화 에칠렌, S3-MC, 프레온, TP-35 등을 사용할 경우 양극에서 CAF가 형성될 수 있다. PCB 표면의 이러한 오염물질은 제거가 쉽지 않기 때문에 사용상 주의를 해야 한다.

23 전기화학적 이온 마이그레이션의 발생조건

절연되어 있는 PCB 표면을 가로지르는 전기화학적 이온 마이그레이션이 발생되기 위해서는 다음과 같은 필요조건을 만족하여야 한다. 첫 번째로 전기적 캐리어(electrical carriers(예: ion))가 존재해야 하며, 두 번째 이온물질(ionic materials)을 분해하고, 이를 이동 가능하게 하기 위한 수분이 반드시 필요하고 마지막으로 두 전극사이에는 전기적 전위(potential)가 반드시 존재하여야 한다. 즉 Fig. 1과 같이 전극과 전극사이에 전계가 형성되어 전위가 존재하여야 하며, 두 전극 사이에는 수분(H₂O)이 존재하여 전기적 캐리어(이온)의 이동이 가능하도록 전기적으로 연결되어야만 이온 마이그레이션이 발생한다는 것을 알 수 있다.

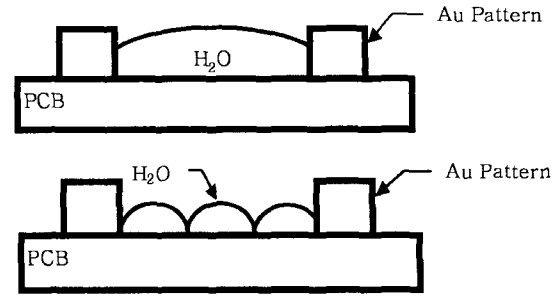


Fig. 1 Schematic generation conditions of ion migration

주요 발생환경으로는 PCB의 외부표면, 내층 계면 또는 솔더 마스크의 계면, 컨포멀 코팅 층 등에서 나타나며, 수지상의 성장은 양극에서 용해된 금속이온을 포함한 용액으로부터 전기적 증착(electro-deposition)에 의해 성장 한다^{1,4)}. PCB 회로의 표면재료가 SnPb 솔더 전도체인 경우 침상의 Sn, Pb가 형성되며, 인가전압이 큰 경우 양극과 음극 간에 브리지가 형성되어 전기적 단락을 유발 한다¹⁾. 형성된 필라멘트의 특성으로는 취성이 크며, 산화에 의해 파괴되기 쉽고, 건조시 표면장력 변화 및 전류가 충분한 경우 연소 현상도 발생된다. 이와 유사한 형태로 양극에서 음극으로 성장하며, 금속염으로 구성되어 있는 전도성 양극 필라멘트가 있으나, 본 고찰에서는 언급하지 않았다.

2.4 이온 마이그레이션 성장속도 가속인자

전기화학적 마이그레이션의 성장속도를 제어하는 주요 인자로는 다음과 같은 항목을 들 수 있고 이 중 주요인자로는 전압과 습도이다. 성장속도에 관한 것은 별도로 언급되어야 할 내용으로 뒤에서 재론하도록 하겠다.

- ① 전압(voltage) : 바이어스 전압의 인가
- ② 상대습도(relative humidity) : PCB에서 금속의 회로 사이에 습기 흡착, 물방울의 응축
- ③ 온도(temperature)
- ④ 오염 및 공정영향(contamination and process effects) : PCB 표면에 존재하는 할로젠과 알칼리와 같은 이온화된 물질
- ⑤ 기판 재질(substrate materials)
- ⑥ 금속 패턴(전극) 재료(electrode materials)
- ⑦ 회로형상 및 패턴간격(circuit geometry and spacing)
- ⑧ 용액의 pH

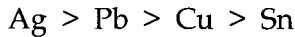
기타 실험적 자료에 따르면 전압이 10배 증가하는 경우 마이그레이션 발생에 의한 수지상의 성장속도는 대략 3배 정도 증가되며, 상대습도가 10% 증가하면

마이그레이션 속도는 약 10배 증가한다. 또한 기판의 수지와 유리섬유의 계면사이에서 오염물질 침투로 층간 분리(delamination)를 유발하며, 솔더링 공정도 오염 원인 중의 하나이다. 기판 재질에 의한 영향을 보면 FR-4 재질 PCB는 BT나 CE 재질 보다 수분흡수가 용이하며, 이온 마이그레이션에 대한 저항이 낮은 편이다. 따라서 마이그레이션에 대한 저항성을 증가시키기 위해서는 사용되는 제품의 제조공정이나 사용 환경에 대한 고려가 반드시 이루어져야 할 것이다.

2.5 전해액에서의 전도현상

2.5.1 표면(Surface)에서 이온 마이그레이션의 전기 화학적 반응

고습과 전계 하에서 금속원자(Ag, Sn, Cu, Au 등)가 수지상 형태로 이동하는 반응이 발생한다. 또한 수분의 pH가 7~9 사이에 존재할 때 발생이 용이하다. 이온 마이그레이션이 발생하기 쉬운 금속 전도체(metal conductor)는 다음과 같은 순으로 발생하기 용이한 경향을 갖는다.



이온 마이그레이션을 발생하는 데는 은(Ag)이 가장 많으며, Bi, Cd, Cu, Pb, Ag, Sn 등과 같은 금속은 증류수와 전계가 존재하는 경우 이온 마이그레이션 발생이 용이한 것도 있고, Au, In, Pd, Pt 등과 같은 금속은 할로젠이온과 함께 증류수 및 전계가 존재하면 발생하기 쉬운 금속도 있다. 다음의 Fig. 2는 금속 이온 마이그레이션 발생 메커니즘에 대한 기본적인 개략도를 나타낸 것이다. 수분의 존재 하에 양극의 구리 이온은 음극으로 이동하여 음극에서 석출이 일어난다. 이러한 반응이 지속됨에 따라 금속의 수지상은 음극에서 양극으로 성장하게 되는 것이다. 이때 양극과 음극에서 일어나는 반응을 보면 다음과 같다.

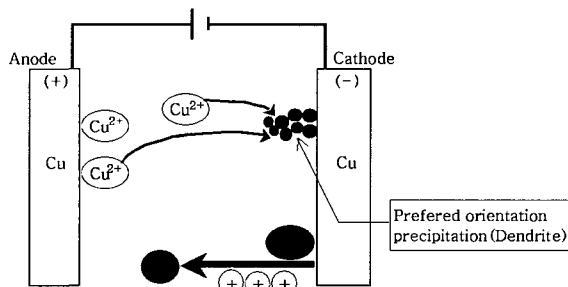
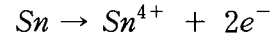
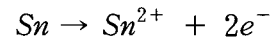
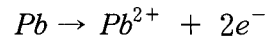
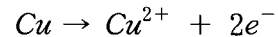
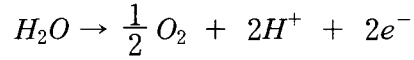
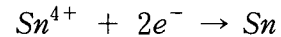
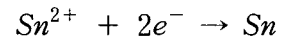
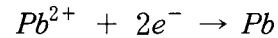
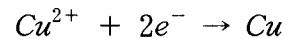
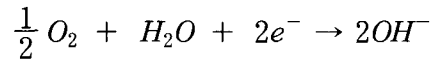


Fig. 2 Mechanism of ion migration phenomena in Cu pattern

- 양극반응(Anodic reaction)



- 음극반응(Cathodic reaction)



3. 전기화학적 이온 마이그레이션 민감도 평가

전자제품 내 PCB에 대한 전기화학적 이온 마이그레이션에 대한 신뢰성평가를 위해 고려해야 할 사항으로는 다음과 같은 항목에 대한 구체적인 정의가 제시되어야 한다.

- 무엇을 평가할 것인가? (재료, 공정, ...)
- 시험조건(온도, 상대습도, 전압, 시간, 장비)
- 시험장비
- 시료 수와 조정
- 평가기준
- 관련사항, 방법의 평가

또한 시험을 수행하는데 있어 평가하는 방법에는 제품의 특성이나, 시험규격, 제조회사에 따라 여러 가지 시험방법이 있다. 예를 들어 물방울시험(Water drop test)은 초고속 시험조건으로 수지상이 수초에서 몇 분 사이에 국부적으로 발생, 성장한다. 그러나 동일한 시험을 환경시험용 항온항습시험 장비를 이용하여 하는 경우 수지상의 성장속도는 물방울 시험과 장시간에 걸친 습도시험 사이에 4 order(1,000배)의 성장속도 차가 발생한다. 따라서 제품에 따라 적절한 시험방법을 적용하여야 할 것이다. 다음은 각종 이온 마이그레이션을 평가하기 위한 시험규격에 대해 정리하면 다음과 같다.

3.1 물방울시험 방법

IPC-TM 650, Method 2.6.13(Water Drop Methods)에서 제안하는 시험규격으로 "Assessment of susceptibility to metallic dendrite growth : Uncoated printed wiring"이 있다. 이 시험방법은 물방울을 사용하는 가속시험방법으로 구체적인 시험 방법은 다음과 같다.

- 시험목적 : 표면 코팅이 안 된 PCB의 잔류이온과 응축된 습기에 대한 수지상 성장의 민감도 평가
- 시험조건 : 대기중, 15V, Water drop, current limiting resistor(max. 1.5mA)
- 시 료 : Military spec. "Y" pattern, Parallel conductors spacing => 15~30 mils.
- 시 료 수 : 10개
- 평가기준 : Dendrite가 두 도선 사이를 지나 연결 되는데 소요되는 시간
- 평가방법 : 고가속시험으로 전기화학적 마이그레이션 민감도를 측정하는 것으로, 증류수(DI water) 방울과 15V bias 하에서 수지상정이 성장하는 시간을 측정하는 방법으로 최대 전류 허용치는 1.5mA이다. 본 시험은 장시간 신뢰성 예측이 아닌 공정조정과 비교를 위한 시험으로 전체 기판 면적이 아닌 일부 국부적인 실험방법으로써 수지상정의 성장을 위해 금속이온이 필요함

3.2 향온향습을 이용한 시험방법

IPC-TM 650, Method 2.6.14에서 제안하는 시험방법으로 향온향습시험기를 사용하여 민감도를 평가하는 방법이며 "Resistance to electrochemical migration, Polymer solder mask"에 대한 시험방법이 있다. 이 시험은 높은 인가전압을 사용함으로 전압이 가속되는 조건이며, 물방울시험방법에 비해 장시간 시간이 소요된다.

- 시험목적 : 고분자 솔더 마스크에서 전기화학적 이온 마이그레이션에 대한 저항성 평가
- 시험조건 : i) Class T - 85±2°C, 90%RH, 500h, 10V bias, limiting resistor(1mA)
ii) Class H - 85°C, 85%RH, 168h
- 시 료 : IPC B-25A PCB
- 시 료 수 : 3개
- 평가기준 : 누설전류를 저항으로 변환하여 발생시간을 측정
- 평가방법 : 누설전류를 측정하여 평가하고, 육안검

사로 필라멘트 성장을 검사하는 것으로 장시간 시험이 필요함

3.3 DuPont사의 시험방법

DuPont에서 제안한 시험방법으로 일렉트로 마이그레이션에 대한 저항성 평가방법이지만 실제 시험은 IPC에서 제안하는 시험방법을 일부 적용하고 있다.

- 시험목적 : 응축된 물을 이용한 Water Drop에 의한 Electromigration 저항성 평가
- 시험조건 : 대기온도, 6.5V, 6~8mA, Water Drop
- 시 료 : not specified
- 시 료 수 : not specified
- 평가기준 : 도체간 수지상의 성장시간
- 평가방법 : IPC-TM-650, 2.6.13, Water Drop Test

3.4 Siemens 등의 시험방법

Siemens-Stromberg-Carlson Electromigration Test/PCK Electromigration Test의 시험방법으로 향온향습시험기를 이용한 시험이다. IPC에서 제안한 500시간, 10V의 인가전압을 적용하고 있다.

- 시험목적 : 영구적 고분자 코팅, 솔더 마스크, 컨포멀 코팅, 접착제, 마킹용 잉크의 일렉트로 마이그레이션에 대한 저항성 평가
- 시험조건 : 85°C, 90%RH, 500h, non-condensing atmosphere, 10V bias, 1M Ω current limiting resistor
- 시 료 : IPC-B-25B 패턴(Coated)
- 시 료 수 : not specified
- 평가기준 : 절연저항(도체간 수지상정 성장 여부)
- 평가방법 : 절연저항 측정

3.5 UNISYS의 시험방법

UNISYS의 일렉트로 마이그레이션 시험방법으로 표면의 저항을 측정한다. IPC에서 제안한 인가전압보다 낮은 조건에서 시험하며, 시험시간도 이보다 짧다.

- 시험목적 : 표면의 electromigration resistance 측정
- 시험조건 : 125 °F, 95%RH, 20h, 250V
- 시 료 : 5000A Cu over 400A Cr on glass, 10mil lines, 50mil spacing
- 시 료 수 : not specified
- 평가기준 : not specified

3.6 Bellcore의 시험방법

Bellcore 규격에서 제안한 시험방법으로 Bellcore TR-NWT-00078, Method 13.1.5가 있다. 이 방법은 인가전압이 없이 평가하는 방법으로 진정한 의미의 이온 마이그레이션 민감도 평가 방법은 아니다.

- 시험목적 : 플럭스, 페이스트, 솔더 와이어, 폴리머 코팅(솔더 마스크, 컨포멀 코팅, 마킹 잉크, 접착제)의 전기적 이온 마이그레이션 저항평가
- 시험조건 : 85°C, 85%RH, 500h → no bias 시험 후 96시간 안정화 후 1M Ohm 저항 초기 SIR reading 45~100V test voltage 후 10V bias remainder of test
- 시 료 수 : 3 patterns for paste, cored wire
6 patterns (3 "Up", 3 down "down") for wave solder, 3 controls
- 시 료 : IPC B-25B or E
- 평가기준 : $IR_{final} > IR_{initial}/10$
20%이상의 전도도 감소가 없어야 함 (10배로 관찰)부식 허용 안됨

여러 가지 제안된 실험방법을 비교해 볼 때 이온 마이그레이션 성장을 관찰하기 위해서는 연속적으로 누설 전류 측정이 바람직하며, 반드시 인가전압과 수분이 존재해야 함을 알 수 있다. 최근에는 시험조건을 더욱 가속시키기 위해 5°C, 60%RH ⇔ 25°C, 90%RH와 같은 Dew condensation 시험도 진행되고 있다.

4. 전기화학적 이온 마이그레이션 민감도 평가를 위한 권고사항

이온 마이그레이션의 민감도를 평가하기 위한 시험의 권고사항은 다음과 같다. IPC 규격에서 제안하는 방법은 금속성 필라멘트 성장의 감수성평가를 위한 초가속 시험으로 인가전압이 없는 시험은 이온 마이그레이션 시험이 아님을 강조하고 있다. 앞서 언급한 시험방법 중 DuPont사의 시험방법이 가장 적절한 시험방법으로 제안되고 있으며 습도를 인가한 조건을 사용하는 시험은 해석하기 곤란하다. 왜냐하면 PCB 표면의 실제 수분 층의 두께는 시험 중 변화가 가능하고, 정의하기 곤란하기 때문이다. Siemens-Stronberg-Carlson과 Bellcore의 시험규격은 시험조건을 잘 조절하고 적절한 시험시간을 갖고 있다고 할 수 있다. 여러 시험방법이 제안되고 있지만 가장 중요한 것은 제품의 사용환경 조건에 적절히 맞아야 하며, 과도한 오버 스트레스가 인가되면

제품의 신뢰성평가를 위한 시험의 목적에 일치하지 않을 수 있으므로 주의해야 한다.

무세척 플럭스를 사용하는 경우, 85°C, 85%RH 또는 65°C, 85%RH에서 시험하여 신뢰성이 인정되었다 해도 실제 사용 중에서 고장이 발생하곤 한다. 이것은 수용성 플럭스 중에서 능금산(malic-acid)으로부터 능금산 잔유물이 휘발하여 불량이 발생하기 때문이다. 또한 85°C 시험 중 폴리아크릴렌 글리콜(polyalkylene glycols)의 분해나 휘발도 가정되기 때문이다. 따라서 이온 마이그레이션의 민감도를 평가하기 위해 가장 중요한 것은 절연저항/누설전류의 연속적 모니터링이 필요하고, 적절한 인가전압을 선택하는 것이며, 환경시험용 챔버의 성능 즉 시험 중 시험장비의 응축방지 등을 충분히 고려하여 평가가 이루어 져야 한다.

5. 물방울시험에 의한 이온 마이그레이션 민감도 평가

실제 이온 마이그레이션의 민감도를 평가하기 위해 PCB의 표면 도금재료를 SnPb, Cu, Au로 도금한 후 물방울시험 방법을 사용하여 실험한 사례를 보도록 하겠다.

5.1 실험조건

본 시험을 위해 Glass/Epoxy계 FR-4 PCB를 사용하였으며, 도체부분을 제외한 부분은 표면 절연코팅을 하였다. 도체간 절연저항은 200MΩ 이상이 되도록 하였고, 패턴은 IPC¹⁾에서 추천하는 빗살무늬 콤 패턴(Comb Pattern)을 사용하였다. 도체간 거리는 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm의 3가지로 제작하였으며, 도체 표면은 Cu(1oz), SnPb(공정솔더, 5μm이상), Au(100wt%, 0.2~0.5μm이상) 전기도금하여 Fig. 3과 같이 제작하였다.

물방울시험 조건은 상온조건(25°C, 30~60%RH)에서 시험하였으며, 인가전압은 15V, 6.5V를 인가하였다. 마이그레이션 발생 후 고장 판단기준은 하나의 도체에서 수지상의 필라멘트가 발생하여 인접한 도체에

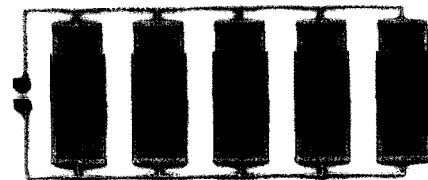


Fig. 3 Photograph of comb pattern PCB for evaluating the ion migration

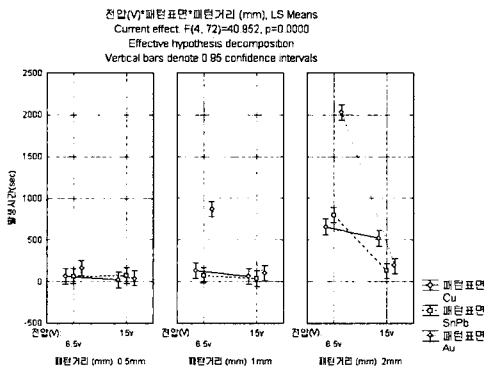
도달하여 접착되는 시간을 마이그레이션 발생시간으로 규정하였고, 육안검사 및 절연저항을 측정하였다.

5.2 물방울시험 결과 및 고찰

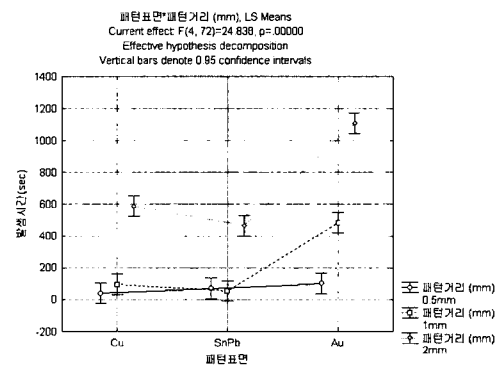
물방울시험을 이용한 이온 마이그레이션 실험은 0.5, 1.0, 2.0 mm의 패턴간격에 Cu, SnPb, Au 3종류로 표면처리된 도체 간에 각각 6.5V와 15V의 인가전압을 인가하여 음극에서 발생한 수지상이 양극의 도체까지 도달되는 시간을 측정하였으며, 측정결과는 다음 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 시험 전 도체간의 절연저항은 200 M Ω 이상을 나타냈으나, 시험 후 측정된 결과 모든 패턴이 0M Ω 으로 패턴 간 완전 단선(short)이 발생한 것을 알 수 있었다. 이 결과를 볼 때 도체간 거리가 0.5mm인 경우 Cu(1.0분), SnPb(1.1분), Au(2.7분)의 순으로 발생하였으며, 도체간 거리가 1.0mm인 경우 SnPb(1.23분), Cu(2.17), Au(2.7분)의 순으로 발생

하였고, 도체간 거리가 2.0mm인 경우 Cu(11분), SnPb(13분), Au(34분)의 순으로 발생하였다. 결과적으로 볼 때 6.5V의 인가전압에서는 Cu 도체가 대체적으로 가장 빠르게 마이그레이션이 발생하였으며, 다음으로 SnPb, Au 순으로 발생하였다. 그러나 Cu와 SnPb의 발생시간은 대체적으로 근사한 값을 보였다.

이러한 결과는 표준전극전위 값³⁾과 비교하여 볼 때 잘 일치하는 것으로 보인다. 표준전극전위 값은 Sn이 -0.136V, Pb가 -0.126V, Cu가 0.333V 그리고 Au가 1.498V이다. (+)전극전위를 가질 경우 귀(noble)하므로 (-)전위를 갖는 원소보다 안정하게 된다. 따라서 SnPb의 경우 Cu와 비슷한 마이그레이션 발생시간을 나타내었지만, Au인 경우 높은 평형전극전위를 가지므로 발생시간은 상대적으로 늦게 나타난 것으로 보인다. 또한 도체간격이 넓은 경우 발생시간의 차이는 많이 나타나지만 0.5mm와 같이 작은 경우 그 차이는 많지 않은 것으로 나타났다. 15V 인가시 도체간격이

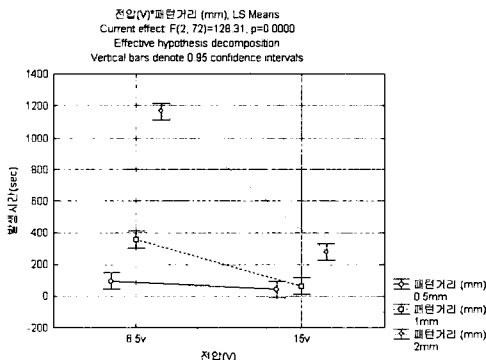


(a) Conductor materials vs. generation time

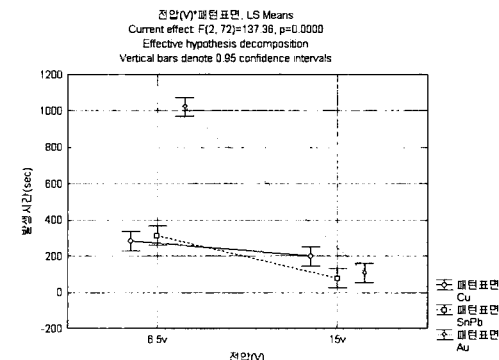


(b) Conductor space vs. generation time

Fig. 4 Ion migration generation time of water drop test as follows of conductor materials and pattern space



(a) Conductor space vs. applied voltage

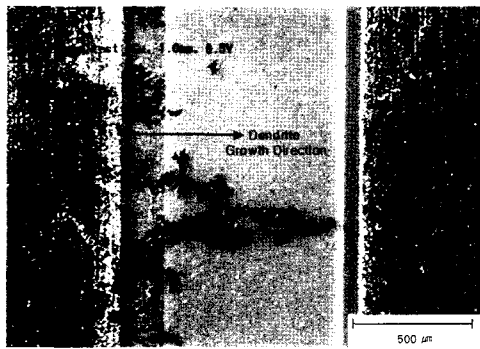


(b) Conductor materials vs. applied voltage

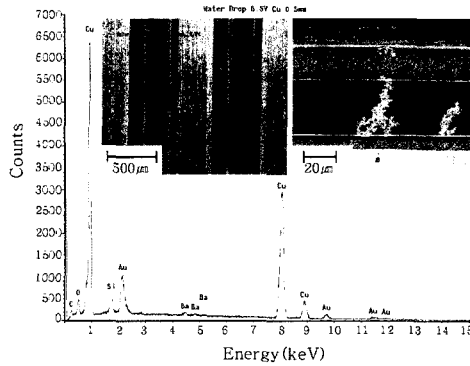
Fig. 5 Ion migration generation time of water drop test as follows of conductor materials and pattern space, applied voltage

0.5mm인 경우 Cu, Au, SnPb의 순으로 나타났으며, 1.0mm는 SnPb, Cu, Au 그리고 2.0mm인 경우는 SnPb, Au, Cu의 순으로 마이그레이션이 발생하였다. 이것은 6.5V에서 발생한 순서와 다소 차이가 나타났으며, 수지상의 성장속도가 일정한 길이 이상에서는 달라지는 것을 알 수 있다. 초기 수지상의 형성에 큰 영향을 미치는 것은 재료의 평형전위³⁾에 의한 값이 좌우하지만, 수지상이 일정길이 이상 형성된 이후에는 성장속도가 평형전위에 따른 값과는 다소 다르게 나타남을 알

수 있다. Fig. 6은 Cu에서 발생한 이온 마이그레이션 결과 형성된 수지상의 광학현미경 사진이며, 수지상 부위를 성분분석한 결과 Cu임을 확인하였다. Cu의 경우 인가전압에 따른 발생시간의 차이는 크게 나타나지 않았으나, SnPb와 Au의 경우 1.0mm이상 수지상이 성장하는 경우 6.5V에 비해 15V의 인가전압이 가해질 때 보다 빠르게 성장하는 것을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 SnPb와 Au 시료에서 발생한 이온 마이그레이션 사진이다. 결과적으로 Cu의 경우 인가전압에 따

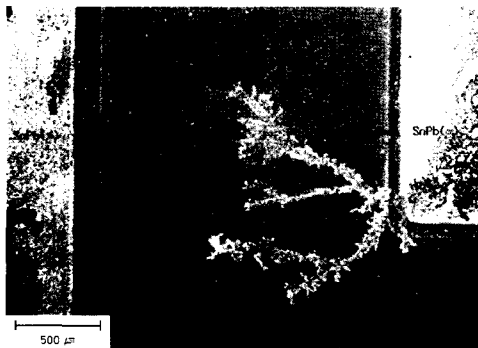


(a) Cu Pattern(1.0mm, 6.5V)

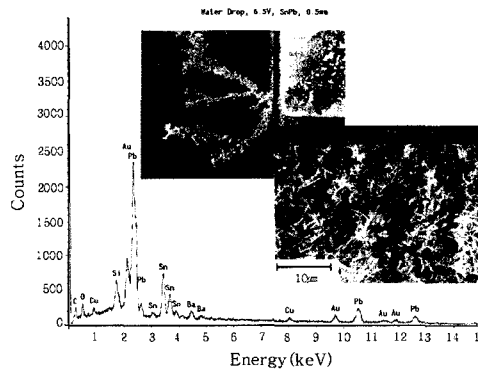


(b) Cu Pattern(0.5mm, 6.5V)

Fig. 6 Photographs and EDX analysis results of Cu ion migration in water drop test



(a) SnPb Pattern(2.0mm, 6.5V)

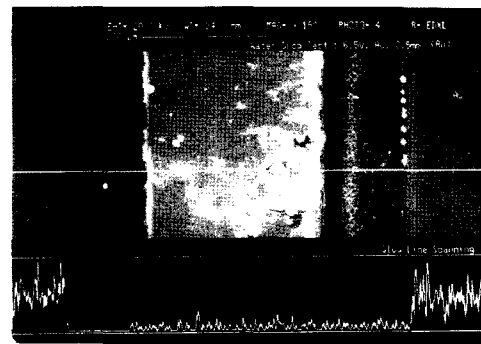


(b) EDX results(0.5/2.0mm, 6.5V)

Fig. 7 Photographs and EDX analysis results of SnPb ion migration in water drop test



(a) Au Pattern(0.5mm, 15V)



(b) Au line profile(0.5mm, 6.5V)

Fig. 8 Photographs and EDX line profile results of Au ion migration in water drop test

라 성장길이와 시간에는 많은 차이가 나타나지 않았으나, SnPb, Au에서는 1.0mm 이상 성장하는 경우 인가전압이 높을수록 빠르게 성장함으로 알 수 있다. 또한 수지상의 금속 필라멘트가 음극에서 양극방향으로 성장하며, 그에 따라 양극 표면재료는 소모되어 가는 것을 알 수 있고 이는 도체간의 전기화학적 반응에 의해 수지상이 성장한다는 이론과 잘 일치함을 알 수 있다.

6. 전기화학적 이온 마이그레이션 방지를 위한 권고사항

이온 마이그레이션을 방지하기 위한 일반적인 방법으로는 우선 마이그레이션을 일으키지 않는 재료를 사용하고, PCB 회로설계시 전극 간격을 넓게, 인가전압을 낮게하여 전계를 낮추어 사용하여야 한다. 또한 전극간의 습기를 차단하여 마이그레이션 발생 가능성을 낮추어야 하며, 재료공정 중 포함된 오염이온의 영향을 최소화하고, 유화성 가스 분위기에서 사용시에는 특히 주의할 요한다. 그리고 갑작스런 온도변화를 가지는 사용환경을 피해야 하며, 외부로부터의 이물질이나 오염을 방지하고 적절한 세척공정을 거쳐야 한다. 이렇듯 이온 마이그레이션은 여러 가지 잠재적인 요인에 의해 발생할 수 있으므로 설계, 제조공정 및 사용 환경에 대한 주의가 필요하다. 주요 인자별 항목을 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다.

- ① 전기화학적 이온 마이그레이션의 주 원인은 유기화합물 또는 비유기물이 전자제품의 표면에 잔류함으로써 발생하는 것이 전형적인 형태로서 이러한 잔유물은 제품의 전기적특성을 저하시킴으로 주의해야 한다.
- ② 컨포멀 코팅 대신 솔더 마스크를 사용하지 말아야 한다. 특별한 경우 솔더 마스크는 도금된 쓰루홀을 덮지 못하고 컨포멀 코팅이 없으면 전기화학적 마이그레이션이 발생한다.
- ③ 고습, 부식, 해로운 환경에서 사용시 반드시 평가/조사가 필요하다.
- ④ 인증/평가되지 않은 재료를 사용하지 말아야 한다.
- ⑤ 선풍 감소나 부품밀도 증가를 위한 변경 전에 설계상에서 잠재적인 전기화학적 마이그레이션 발생원인을 고려하고 결정해야 한다.
- ⑥ 마이그레이션이 잘되는 금속의 사용을 피해야 한다 (예, 하이브리드 기판에서 Ag 솔더 사용).
- ⑦ 최종 제품의 세척 후에는 취급을 최소화해야 한다.
- ⑧ 손에서 염의 오염 발생이 가능함으로 오염방지용 보호 장갑을 사용한다.
- ⑨ 잔유물 검사를 하여도 모든 부위에서 검사가 되지

않으며, 적은 영역에서 항상 오염이 시작될 수 있음을 명시해야 한다.

- ⑩ 솔더링을 위해 최소 플럭스를 사용(접합부에 과도한 플럭스를 사용하지 말 것)하고, 보증된 세척제를 사용해야 한다.
- ⑪ 계면활성제, 유화제, 비누 세척제를 사용할 경우 조립품에 잔존하지 않도록 한다.
- ⑫ 국부가열은 습기 응축을 막을 수 있다. 필요시 설계에 적용이 가능하다.
- ⑬ 솔더 마스크, 컨포멀 코팅과 같은 폴리머 코팅은 작업지침에 따라 전기화학적 이온 마이그레이션을 막기 위해 완벽히 경화시킨다.
- ⑭ UV-경화 코팅시 규정된 최대 두께를 초과하지 말아야 한다. 규정된 두께를 초과한 코팅은 완벽히 경화되지 않고, 이온 마이그레이션을 유발할 수 있다.

7. 결 론

전자제품 PCB에서 발생하는 이온 마이그레이션 현상에 대한 기본적인 정의와 발생 메커니즘을 소개하였으며, 신뢰성평가를 위한 시험방법에 대한 조사하였다. 이온 마이그레이션에 대한 민감도를 평가하기 위한 시험방법으로 물방울시험과 향온향습시험에 대한 국제규격 및 제조사별 규격을 검토하였으며, 이를 기초로 가장 일반적으로 사용되고 있는 물방울시험에 대한 시험 사례를 소개하였다. 물방울시험에서는 도체 거리, 재료 및 인가전압에 따른 이온 마이그레이션 발생속도를 조사하였다. 그 결과 물방울시험이 타 시험방법에 비해 가혹한 조건으로 수지상의 성장을 단시간에 관찰하는데 유용하다는 것을 알 수 있었다. 동일한 시험을 환경시험용 향온향습시험 장비를 이용하여 하는 경우 수지상의 성장속도는 물방울 시험과 장시간에 걸친 습도시험 사이에 4 order(1,000배)의 성장속도 차가 발생한다는 보고도 있다. 저자가 실험한 물방울시험에서 인가전압이 6.5V인 경우 이온 마이그레이션은 Cu, SnPb, Au 순으로 발생하였고 Cu와 SnPb는 발생시간이 유사하였다. 기전력계열(EMF Series)에서 전기화학적으로 비슷한 평형전위를 갖는 재료는 이온 마이그레이션 발생시간이 유사하게 나타나며, 귀(noble) 전위 값을 갖는 재료일수록 발생시간이 지연됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 도체간격이 작은 경우(0.5mm) 발생시간의 차이가 크지 않지만 도체간격이 큰 경우(1.0mm 이상) 발생시간의 차이를 명확히 구분할 수 있었다. 또한 인가전압이 15V인 경우 수지상의 석출 반응속도가 증가됨에 따라 도체간격과 도체재료에 따른 발생시간의 차이는 작았으며, 인가전압이 높은 경우 수지상의 초기 발생에는 큰 차이가 없지만 수지상이 발생한 후 성장하

는데 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 결국 수지상의 형성 초기에는 재료의 평형전위 값이 발생속도를 좌우하지만, 수지상이 1.0 mm 이상 형성된 이후에는 인가 전압과 도체재료에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

최근 선진각국의 친환경 정책에 따라 대다수 전자업체가 무연솔더를 적용하여 제품을 생산하고 있으나, 일부 전자업체를 제외하고는 무연화 적용 제품에 대한 명확한 신뢰성평가 방안이 제시되고 있지 않다. 따라서 본지에서 소개한 이론과 실험 사례에 대한 연구내용이 무연 솔더를 적용한 전자제품의 이온 마이그레이션 특성 평가 및 신뢰성평가 측면에서 기여하기를 바란다.

후 기

본 연구의 일부는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-01)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.



- 홍원식(洪源植)
- 1968년생
- 전자부품연구원 신뢰성평가센터 선임연구원
- 무연 솔더링, 패키지 신뢰성, 접합
- e-mail : wshong@keti.re.kr



- 정승부(鄭承富)
- 1959년생
- 성균관대학교 마이크로 전자 및 반도체 패키징 기술개발 사업단
- 전자 패키징, 패키지 신뢰성, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.ac.kr

참 고 문 헌

1. The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuit, IPC-TR-476A Electrochemical Migration (1997)
2. The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuit, IPC-TM-650 Test Methods Manual (1973)
3. M. G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd ed., p.41, M. B. Bever, McGraw-Hill, New York, (1987).
4. Y. Kin, ESPEC Technology Report, 2, 1 (1996)
5. H. Tanaka, Y. Aoki and S. Yamamoto, Espec Technology Report, 4, 10 (1997)
6. T. Ohtori, J. of Jpn. Inst. Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, 10(2), 80 (1995).
7. Y. Aoki, H. Tanaka, S. Yamamoto and O. Obata, Espec Technology Report, 1, 16 (1996)
8. S. J. Krumbein. IEEE Trans. Relr, 44, 539 (1995).
9. H. Tanaka, H. Hiramatsu, K. Kumekawa, F. Ueta, S. Yoshihara and T. Shirakashi, J. of Jpn. Inst. Electronics Packaging, 5(2), 188 (2002)



- 김광배(金光培)
- 1954년생
- 한국항공대학교 항공재료공학과 교수
- 기능성 재료, 초소성 재료, 부식방식
- e-mail : kbkim@hau.ac.kr