

PCB의 금속 이온 마이그레이션 현상에 관한 연구

홍원식^{*,**†} · 강보철^{*} · 송병석^{*} · 김광배^{**}

*전자부품연구원 신뢰성평가센터

**한국항공대학교 항공재료공학과

A Study on the Metallic Ion Migration Phenomena of PCB

Won Sik Hong^{*,**†}, Bo-Chul Kang^{*}, Byeong Suk Song^{*} and Kwang-Bae Kim^{**}

*Reliability and Failure Analysis Center, Korea Electronics Technology Institute

**Department of Materials Engineering, Hankuk Aviation University

(2004년 11월 26일 받음, 2005년 1월 3일 최종수정본 받음)

Abstract Recently a lots of problems have observed in high densified and high integrated electronic components. One of them is ion migration phenomena, which induce the electrical short of electrical circuit. Ion migration phenomena has been observed in the field of exposing the specific environment and using for a long time. This study was evaluated the generation time of ion migration and was investigated properly test method through water drop test and high temperature high humidity test. Also we observed direct causes and confirmed generation mechanism of dendritic growth as we reproduced the ion migration phenomena. We utilized PCB(printed circuit board) having a comb pattern as follows 0.5, 1.0, 2.0 mm pattern distance. Cu, SnPb and Au were electroplated on the comb pattern. 6.5 V and 15 V were applied in the comb pattern and then we measured the electrical short time causing by ion migration. In these results, we examined a difference of ion migration time depending on pattern materials, applied voltage and pattern spacing of PCB conductor.

Key words ion migration, dendritic growth, PCB, water drop test, reliability.

1. 서 론

최근의 전자부품은 고밀도 고집적화 됨에 따라 여러 가지 문제점들이 발생되고 있다. 그 중 부품이 실장되는 부분에 사용되는 솔더(solder)나 전기적 회로간에 금속 이온 마이그레이션(metallic ion migration)이 발생하여 전기적 단락(short)을 유발함으로써 전자제품의 치명적 고장을 유발한다.¹⁾ 이러한 마이그레이션 현상은 제품이 특정 환경 하에 일정 시간 노출되었을 경우 관찰될 수 있는 현상이다. 전기화학적 반응에 의해 발생하는 이온 마이그레이션은 PCB 표면에 습기나 오염물질이 존재하고 전압이 인가된 상태에서 회로 상에 전도성 금속 수지상(dendrite) 형태의 필라멘트(filament)가 성장하는 현상이다. 발생환경으로는 PCB의 외부표면, 내층 계면 또는 솔더 마스크(solder mask)의 계면, 컨포멀 코팅(conformal coating) 층 등에서 나타나며, 수지상의 성장은 양극에서 용해된 금속이온을 포함한 용액으로부터 전기적 증착(electro-deposition)에 의해 성장한다.^{1,4)} PCB 회로의 표면재료가 SnPb 솔더 전도체인 경우 칩상의 Sn, Pb가 형

성되며, 인가전압이 큰 경우 양극과 음극간에 브리지(bridge)가 형성되어 전기적 단락을 유발한다.¹⁾ 형성된 필라멘트의 특성으로는 취성이 크며, 산화에 의해 파괴되고, 건조시 표면장력 변화 및 전류가 충분한 경우 연소(burn-out) 현상도 발생된다. 이와 유사한 형태로 양극에서 음극으로 성장하며, 금속염(metallic salt)으로 구성되어 있는 전도성 양극 필라멘트(conductive anodic filament: CAF)가 있으나, 본 연구에서는 고려하지 않았다. 전기화학적 이온 마이그레이션이 발생되기 위해서는 도체간에 이온과 같은 전기적 캐리어의 존재가 필요하다. 또한 이온 물질을 분해하고, 이동 가능하게 하기 위한 수분이 반드시 필요하고, 도체사이에 전기적 전위(electrical potential)가 존재하여야 한다. 이온 마이그레이션의 성장속도를 제어하는 주요 인자로는 전압, 상대습도, 온도, 오염 및 공정영향, 기판 재질, 도체(전극) 재료, 회로형상 및 도체 간격 등이 있다.

본 연구에서는 전자제품에서 발생하는 고장원인 중 하나인 이온 마이그레이션 현상에 대해 발생 환경적 영향을 조사하기 위해 물방울시험(water drop test)과 고온고습시험(high temperature and high humidity test)으로써 재현하였다. 또한 전자제품 설계에 고려되어야 할 인자

†E-Mail : wshong@keti.re.kr

들의 영향을 조사하기 위해 도체 거리(0.5, 1.0, 2.0 mm), 재료(Cu, SnPb, Au) 및 인가전압(6.5 V, 15 V)에 따른 이온 마이그레이션 발생시간의 차이를 물방울시험과 고온고습시험 방법으로 조사하였다. 이로부터 도체재료에 따른 이온 마이그레이션 발생시간을 회귀분석을 사용하여 예측하였다.

2. 실험 방법

2.1 콤 패턴(Comb Pattern) 기판

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

2.2 실험조건

이온 마이그레이션 실험^{2,4)}은 물방울시험과 고온고습시험으로 진행하였다. 물방울시험은 상온조건(25°C, 30~60%RH)에서 시험하였으며, 인가전압은 15 V, 6.5 V를 인가하였다. 마이그레이션 발생 후 고장 판단기준은 하나의 도체에서 수지상의 필라멘트(filament)가 발생하여 인접한 도체에 도달하여 접촉되는 시간을 마이그레이션 발생시간으로 규정하였고, 육안검사 및 절연저항을 측정하였다. 고온고습시험은 85°C, 85%RH의 환경에서 도체에 인가전압을 6.5 V, 15 V 인가하였으며, 24시간마다 중간 측정으로 육안검사 및 절연저항을 측정하여 총 1,000시간 시험을 진행하였다(Fig. 2). 모든 실험은 동일조건에서 5개를 시험하여 평균값을 취하였다.

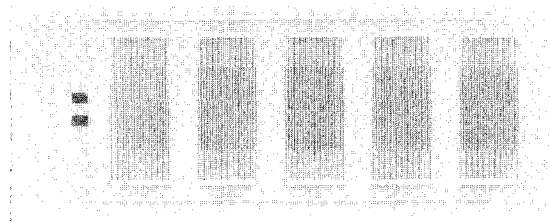


Fig. 1. Photographs of comb pattern PCB for ion migration test.

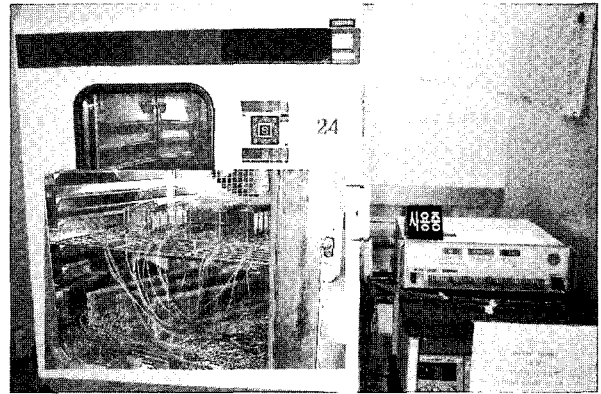


Fig. 2. Photographs of high temperature and high humidity test.

3. 결과 및 고찰

3.1 물방울시험(water drop Test)

물방울시험을 이용한 이온 마이그레이션 실험은 0.5, 1.0, 2.0 mm의 패턴간격에 Cu, SnPb, Au 3종류로 표면 처리된 도체간에 각각 6.5 V와 15 V의 인가전압을 인가하여 음극에서 발생한 수지상이 양극의 도체까지 도달되는 시간을 측정하였으며, 측정결과는 다음 Fig. 3과 같다. 시험 전 도체간의 절연저항은 200 MΩ 이상을 나타

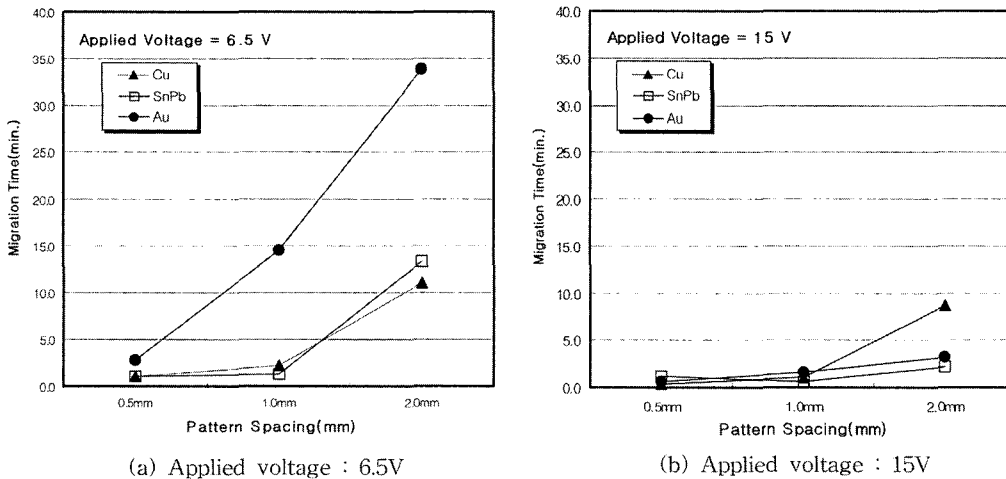


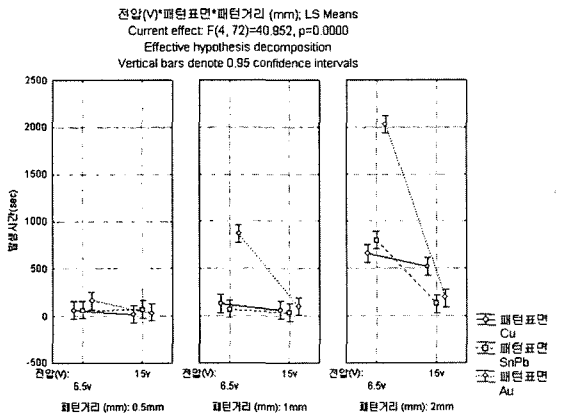
Fig. 3. Ion migration generation time vs. conductor materials and applied voltage of water drop test.

냈으나, 시험 후 측정된 결과 모든 패턴이 0 MΩ로 패턴간 완전 단선(short)이 발생한 것을 알 수 있었다. Fig. 3(a)는 물방울시험에서 도체간에 6.5 V의 인가전압을 인가한 경우 마이그레이션이 발생한 시간을 나타낸 그래프이다. 이 결과를 볼 때 도체간 거리가 0.5 mm인 경우 Cu(1.0분), SnPb(1.1분), Au(2.7분)의 순으로 발생하였으며, 도체간 거리가 1.0 mm인 경우 SnPb(1.23분), Cu(2.17분), Au(2.7분)의 순으로 발생하였고, 도체간 거리가 2.0 mm인 경우 Cu(11분), SnPb(13분), Au(34분)의 순으로 발생하였다. 결과적으로 볼 때 6.5 V의 인가전압에서는 Cu 도체가 대체적으로 가장 빠르게 마이그레이션이 발생하였으며, 다음으로 SnPb, Au 순으로 발생하였다. 그러나 Cu와 SnPb의 발생시간은 대체적으로 근사한 값을 보였다.

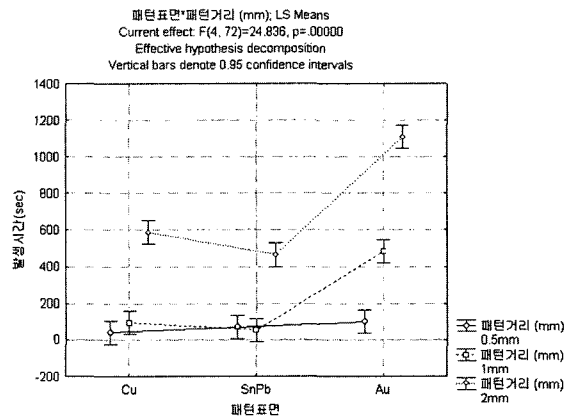
이러한 결과는 표준전극전위 값³⁾과 비교하여 볼 때 잘 일치하는 것으로 보인다. 표준전극전위 값은 Sn이 -0.136 V, Pb가 -0.126 V, Cu가 0.333 V 그리고 Au가 1.498V이다.

(+)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 0.5 mm와 같이 작은 경우 그 차이는 많지 않은 것으로 나타났다. 15 V 인가시 도체간격이 0.5 mm인 경우 Cu, Au, SnPb의 순으로 나타났으며, 1.0 mm는 SnPb, Cu, Au 그리고 2.0 mm인 경우는 SnPb, Au, Cu의 순으로 마이그레이션이 발생하였다. 이것은 6.5 V에서 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. 4, 5, 6은 도체 표면 재질과 도체간 거리에 따라

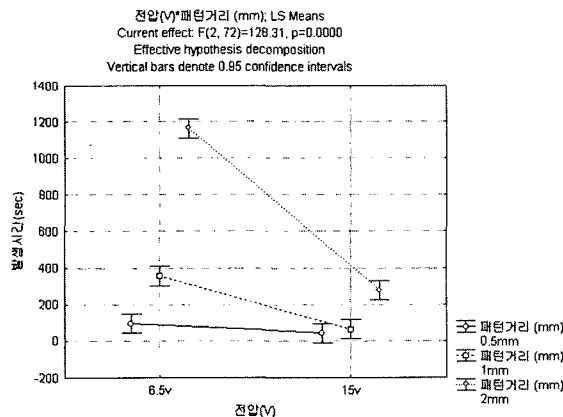


(a) Conductor materials vs. generation time

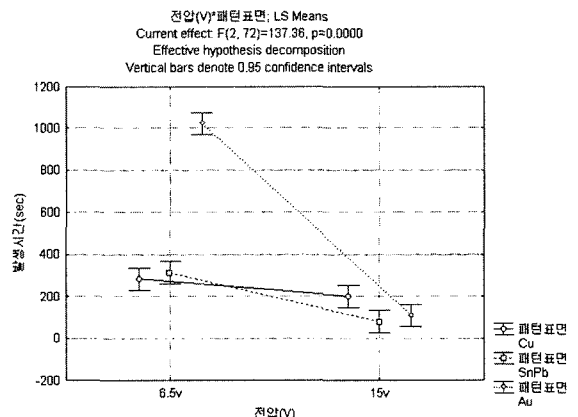


(b) Conductor space vs. generation time

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

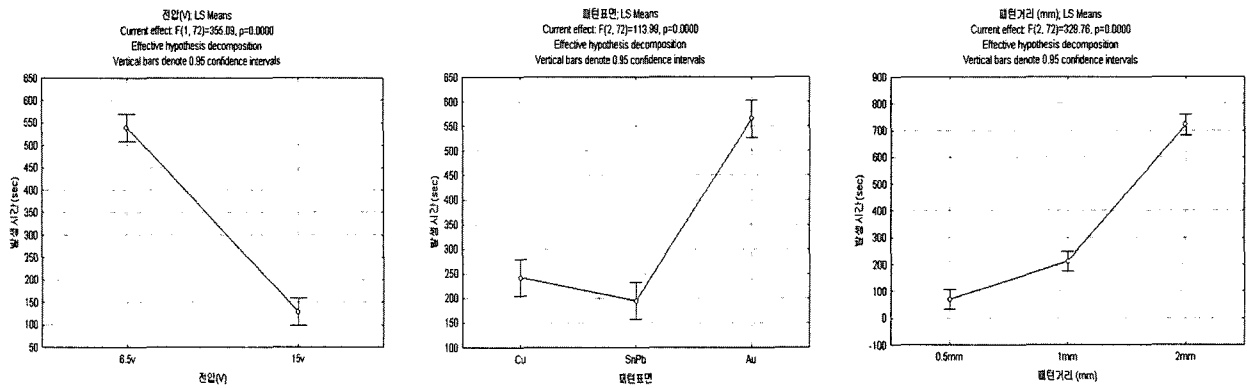
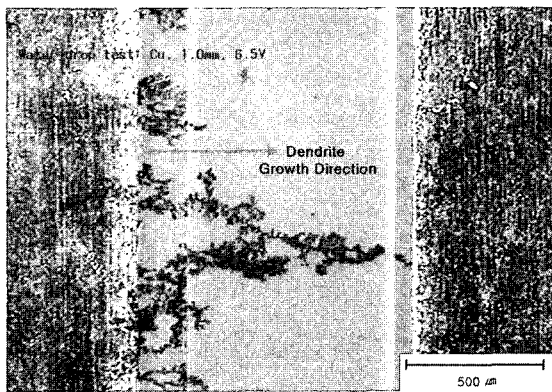


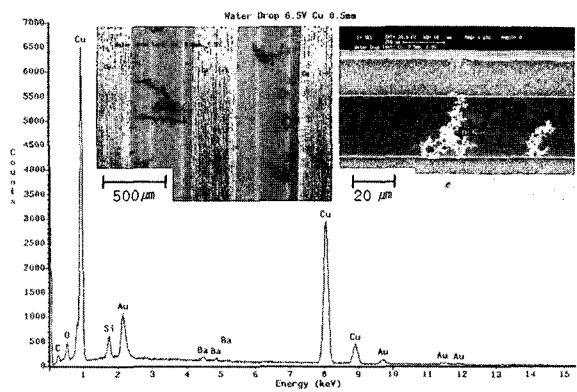
Fig. 6. Summary of ion migration time in water drop test.

전압 차이에 의한 발생시간을 정리한 결과이다. Cu의 경우 인가전압에 따른 발생시간의 차이는 크게 나타나지 않았으나, SnPb와 Au의 경우 1.0mm 이상 수지상이 성장하는 경우 6.5 V에 비해 15 V의 인가전압이 가해질 때 보다 빠르게 성장하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 Cu의 경우 인가전압에 따라 성장길이와 시간에는 많은 차

이가 나타나지 않았으나, SnPb, Au에서는 1.0 mm 이상 성장하는 경우 인가전압이 높을수록 빠르게 성장함으로 알 수 있다. Fig. 7, 8, 9는 도체 재료가 Cu, SnPb, Au인 경우 발생한 이온 마이그레이션 발생 사진이다. 수지상의 금속 필라멘트가 음극에서 양극방향으로 성장하며, 그에 따라 양극 표면재료는 소모되어 가는 것을 알 수

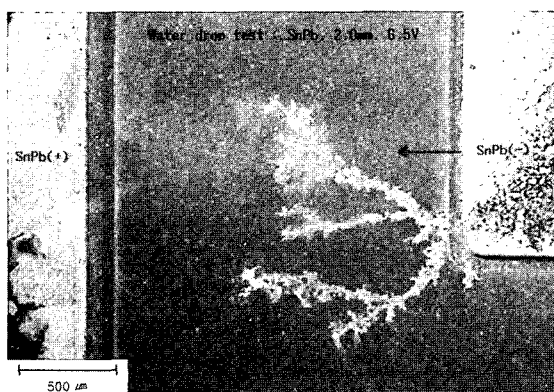


(a) Cu Pattern(1.0mm, 6.5V)

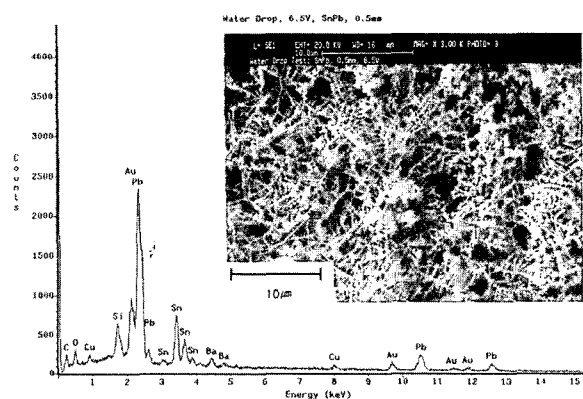


(b) Cu Pattern(0.5mm, 6.5V)

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

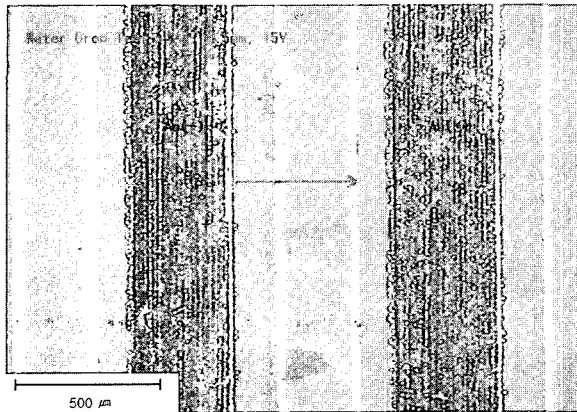


(a) SnPb Pattern(2.0mm, 6.5V)

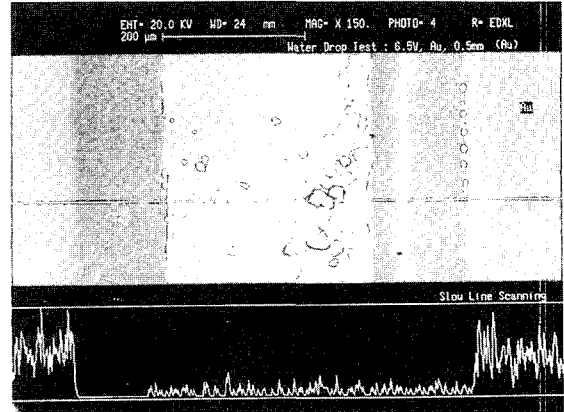


(b) EDX results(0.5mm, 6.5V)

Fig. 8. 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. 9. Photographs and EDX line profile results of Au ion migration in water drop test.

있고 이는 도체간의 전기화학적 반응에 의해 수지상이 성장한다는 이론과 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 이온 마이그레이션 발생 메카니즘^{1,3-7)}

PCB 표면에서 이온 마이그레이션의 전기화학적 반응은 일반적으로 고습과 전계 하에서 금속원자(Ag, Sn, Cu, Au 등)가 수지상 형태로 이동하는 반응이 발생하며, 수분의 pH가 7~9 사이에 존재할 때 발생이 용이하다. 이온 마이그레이션은 Ag에서 가장 많으며, Bi, Cd, Cu, Pb, Ag, Sn 등과 같은 금속은 증류수와 전계가 존재하는 경우 발생이 용이하며, Au, In, Pd, Pt 등과 같은 금속은 할로겐이온과 함께 증류수 및 전계가 존재하면 발생할 수 있다. 이온 마이그레이션이 발생하기 쉬운 금속 전도체는 Ag > Pb > Cu > Sn의 순으로 발생이 용이한 경향을 갖는 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 양극과 음극의 도체 사이에서 이온 마이그레이션의 발생 및 수지상의 성장 메카니즘과 전극에서의 발생반응을 관찰하면 Fig. 10과 같다. Cu의 경우 도체 사이에 전압과 수분이 존재할 경우 양극에서 구리는 이온화되어 음극에 석출하게 된다. 이러한 석출반응이 지속되면, 음극에서 양극 방향으로 Cu의 수지상이 성장하게 되며, 결국 두 도체간의 단락을 유발하게 된다. 이때 양극과 음극에서 다음과 같은 전기화학적 반응에 의해 음극에서 금속이온이 석출하게 된다.

3.3 회귀분석 결과

물방울시험을 통해 이온 마이그레이션이 발생시간을 표면 도체재료와 전압에 대하여 회귀분석한 결과 신뢰수준 95% 이상 유의(confidence)한 것으로 나타났으며, 이로부터 이온 마이그레이션 발생시간이 도체 표면재료인 Cu, SnPb, Au에 따라 Fig. 11과 같이 예측되었다. 이온 마이그레이션 발생시간을 보면 도체 표면재료가 구리인 경우가 가장 빠르고, 다음으로 SnPb, Au의 순으로 발생하

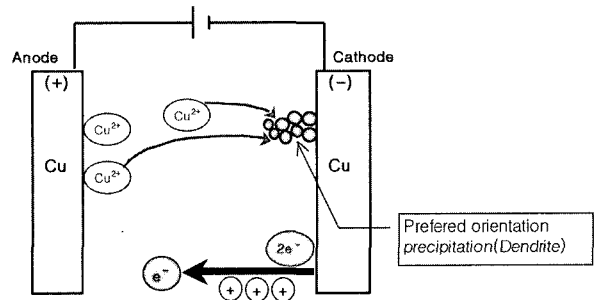
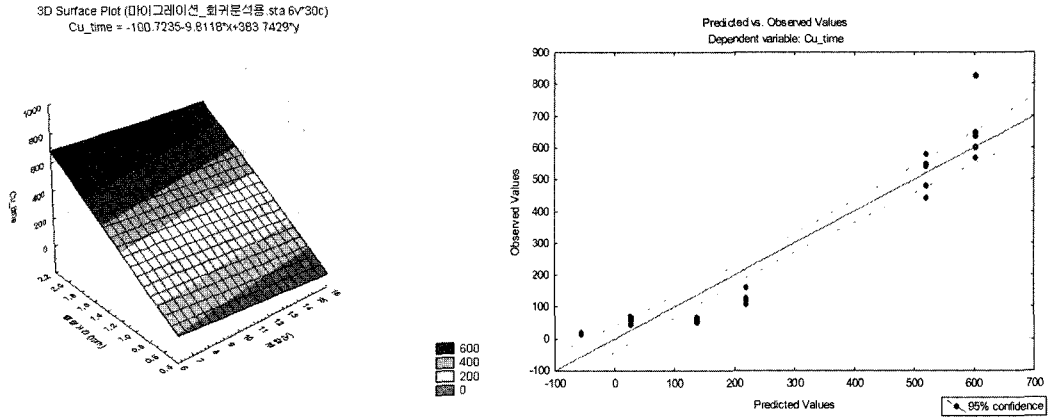


Fig. 10. Schematic diagram of generation mechanism for Cu ion migration.

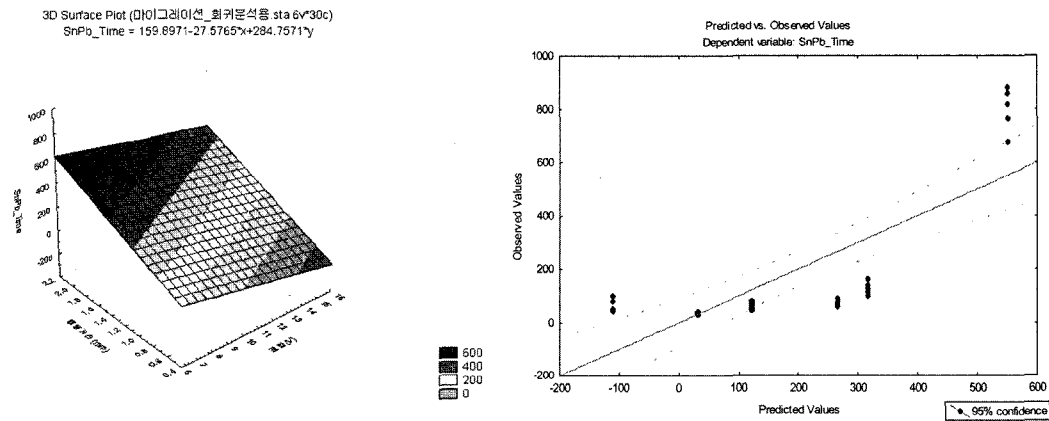
는 것으로 나타났으며, 도체 표면재질에 따라 이온 마이그레이션 발생시간과 도체거리, 전압과의 관계를 보면 다음과 같다. 여기서 Time은 이온 마이그레이션 발생시간(sec), X는 인가전압(Volt), Y는 도체거리(mm)이다.

3.4 고온고습시험(high temperature and high humidity test)⁵⁻⁹⁾

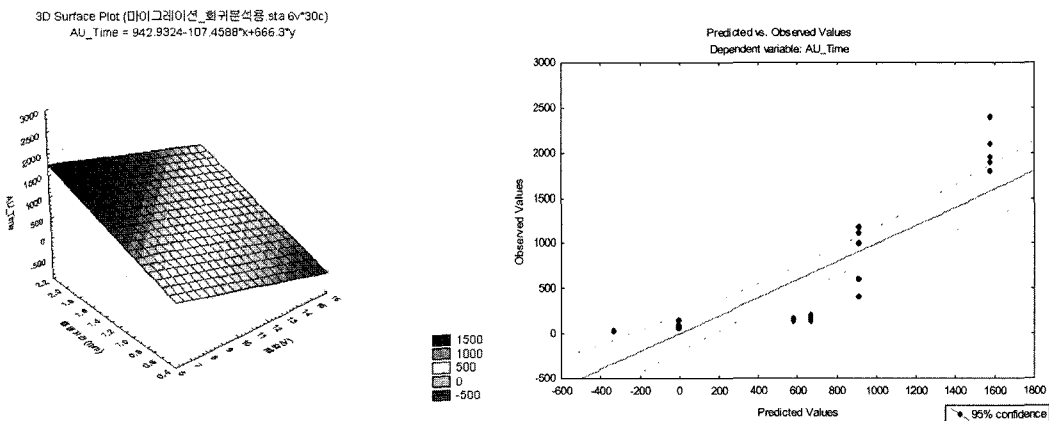
고온고습시험용 시료는 물방울시험과 동일한 조건으로 0.5, 1.0, 2.0 mm의 도체간격에 Cu, SnPb, Au 3종류의 표면처리된 도체 사이에 각각 6.5 V와 15 V의 인가전압을 85°C, 85%RH 환경에서 1,000시간 동안 인가하였으며, 24시간마다 육안검사 및 현미경검사를 통하여 마이그레이션 발생여부를 관찰하였다. 시험 전후 절연저항을 각각 측정된 결과 초기 200 MΩ 이상에서 1,000시간 경과 후 모든 시료에서 0 MΩ으로 나타났다. 이것은 전기적으로 도체간에 절연성의 저하로 발생한 것으로 마이그레이션 현상에 의한 것으로 사료된다. 그러나 물방울시험에서와 같이 육안으로 구별될 수 있는 수지상이 관찰되지는 않았으나 도체사이에 대해 EDX line profile을 한 결과(Fig. 12) Cu, Sn, Pb, Au가 도체 사이의 PCB 표면에서 검출되는 것으로 보아 도체 표면원소의 이동이 발



(a) Cu ion migration



(b) SnPb ion migration



(c) Au ion migration

Fig. 11. 3D surface plot and prediction for ion migration time using by regression analysis as follows of applied voltage and conductor materials in water drop test.

생한 것을 알 수 있다. 그러나 본 실험에서 사용한 육안 검사와 시험전후의 절연저항 측정으로는 정확한 이온 마이그레이션의 발생시점을 확인할 수 없었으며, 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 실시간으로 절연저항을 측정하는 방법이 보다 효과적인 시험방법인 것으로 사료된다. 또

한 고온고습시험의 경우에는 물방울시험에서 인가되었던 15 V 내외의 인가전압보다 큰 인가전압을 사용하는 것도 효과적인 이온 마이그레이션 관찰 방법인 것으로 판단된다. 일반적으로 PCB에 대한 전기화학적 이온 마이그레이션에 대한 시험 중 고려해야할 사항으로는 재료,

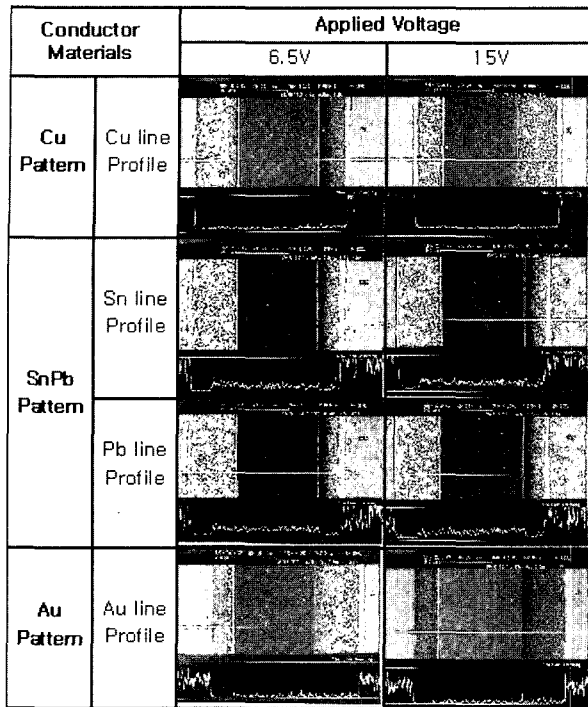


Fig. 12. EDX line profile results of high temperature and high humidity test.

공정, 시험조건(온도, 상대습도, 전압, 시간, 장비), 평가 기준 등이 있으며, 이중 온도, 습도, 인가전압의 조건은 이온 마이그레이션을 유발하는 가속인자가 된다. 또한 시험을 수행하는데 있어 평가하는 방법도 제품 특성, 시험 규격, 제조회사에 따라 여러 가지 시험방법이 있다. 예를 들어 물방울시험은 고가속시험 조건으로 수지상이 수 초에서 몇 분 사이에 극부적으로 발생, 성장하지만, 동일시험을 항온항습기를 이용하여 하는 경우 수지상의 성장속도는 장시간이 소요되며, 일부 보고에 의하면 물방울시험과 습도시험 사이에 약 4 order(1,000배)의 성장속도 차가 발생한다고 한다.¹⁾ 따라서 제품에 따라 적절한 시험방법을 적용하여야 할 것이다.

4. 결 론

전자제품의 PCB에서 발생하는 이온 마이그레이션 현상을 물방울시험과 고온고습시험 방법으로 재현하고, 시험방법에 따른 차이점을 비교하였다. 또한 도체 거리, 재

료 및 인가전압에 따른 발생속도를 조사하였다. 그 결과 물방울시험이 타 시험방법에 비해 가혹한 조건으로 수지상의 성장을 단시간에 관찰하는데 유용하다는 것을 알 수 있었다. 물방울시험에서 인가전압이 6.5 V인 경우 이온 마이그레이션은 Cu, SnPb, Au 순으로 발생하였고 Cu와 SnPb는 발생시간이 유사하였다. 기전력계열(EMF Series)에서 전기화학적으로 유사한 평형전위를 갖는 재료는 이온 마이그레이션 발생시간이 유사하게 나타나며, 귀(noble) 전위 값을 갖는 재료일수록 발생시간이 지연됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 도체간격이 작은 경우(0.5 mm) 발생시간의 차이가 크지 않지만 도체간격이 큰 경우(1.0 mm 이상) 발생시간의 차이를 명확히 구분할 수 있었다. 또한 인가전압이 15 V인 경우 수지상의 석출 반응속도가 증가됨에 따라 도체간격과 도체재료에 따른 발생시간의 차이는 작았으며, 인가전압이 높은 경우 수지상의 초기 발생에는 큰 차이가 없지만 수지상이 발생한 후 성장하는데 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 결국 수지상의 형성 초기에는 재료의 평형전위 값이 발생속도를 좌우하지만, 수지상이 1 mm 이상 형성된 이후에는 인가전압과 도체재료에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 도체 재료 및 거리, 인가전압에 따른 이온 마이그레이션 발생시간에 대해 회귀분석 결과 신뢰수준 95% 이상 유의한 것으로 사료된다.

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).