

고온고습 전압인가(Biased HAST) 시험에서 인쇄회로기판의 이온 마이그레이션 불량 메커니즘

허석환[†] · 신안섭 · 함석진
삼성전기 ACI사업부

Ion Migration Failure Mechanism for Organic PCB under Biased HAST

Seok-Hwan Huh[†], An-Seob Shin and Suk-Jin Ham

ACI Division, Samsung Electro-Mechanics, Busan 618-819, Korea

(Received March 10, 2015; Corrected March 25, 2015; Accepted March 27, 2015)

초 록: 전자 제품의 경박 단소화 및 고집적화가 이루어 지면서 반도체 칩뿐만 아니라 유기 기판도 고집적화가 요구되고 있다. 본 연구는 인쇄회로기판의 미세 피치 회로에 대한 고온고습 전압인가 시험을 실시하여 불량 메커니즘을 연구하였다. 130°C/85%RH/3.3V와 135°C/90%RH/3.3V 시험조건에서 고온고습 전압시험(Biased HAST)의 가속 계수는 2.079로 계산되었다. 불량 메커니즘 분석을 위하여 집속이온빔(FIB) 분석이 이용되었다. (+)전극에서는 콜로이드 형태의 Cu_xO 와 $Cu(OH)_2$ 가 형성되었으며, (-)전극에서는 수지형태의 Cu가 관찰되었다. 이를 통해 Cu^{2+} 이온과 전자(e^-)가 결합한 수지상 Cu에 의해 절연파괴가 일어난다는 것을 확인하였다.

Abstract: By the trends of electronic package to be smaller, thinner and more integrative, organic printed circuit board is required to be finer Cu trace pitch. This paper reports on a study of failure mechanism for PCB with fine Cu trace pitch using biased HAST. In weibull analysis of the biased HAST lifetime, it is found that the acceleration factor (AF) of between 135°C/90%RH/3.3V and 130°C/85%RH/3.3V is 2.079. A focused ion beam (FIB) was used to polish the cross sections to reveal details of the microstructure of the failure mode. It is found that $Cu_xO/Cu(OH)_2$ colloids and Cu dendrites were formed at anode (+) and at cathode (-), respectively. Thus, this gives the evidence that Cu dendrites formed at cathode by Cu^{2+} ion migration lead to a short failure between a pair of Cu nets.

Keywords: Biased HAST, Organic PCB, Copper, Ion migration

1. 서 론

모바일 기기의 발달은 전자제품의 고집적화에 대한 지속적인 요구로 인쇄회로기판에서의 미세 배선 또한 예외가 아니다. 이러한 고집적화 된 인쇄회로기판은 보다 극한 환경에서 고신뢰도를 요구하고 있다. 인쇄회로기판의 미세 배선화는 고온, 고습, 고전압의 환경에서 불안정한 전기 화학적 상황에 놓이게 되고, 이는 취약한 신뢰성으로 나타나 많은 손실이 보고 되고 있다.¹⁻³⁾ 이에 전자 부품에서의 금속 이온 마이그레이션(metallic ion migration)과 위스커(whisker)에 연구가 다수 보고되고 있다.^{4,5)}

Hong 등은 PCB 표면에 습기나 오염물질이 존재하고 전압이 인가된 상태에서 회로 상에 전도성 금속 수지상

(dendrite) 형태의 필라멘트(filament)가 성장함을 보고 하였고, 이러한 수지상의 성장은 양극에서 용해된 금속 이온을 포함한 용액으로부터 전기분해(electro-deposition)에 의해 성장한다고 하였다.⁶⁾ Tanaka 등은 이온 마이그레이션에 의한 절연 열화 현상을 연구하였으며, 특히 프린트배선의 전극간 흡습이나 결로 상태에서의 전계 인가로 인한 이온 마이그레이션을 관찰하였으며, 형태나 상황에 따라 덴드라이트(dendrite)와 CAF (conductive anodic filament)로 구분하였다.⁷⁾ 하지만, 많은 연구자들은 물방울 드롭 시험을 통하여 물에서의 Cu 덴드라이트 성장을 관찰, 규명하였으나, 예폭시계 절연 물질에서의 Cu 반응 성장을 규명한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 미세 배선을 가진 인쇄회로기판에서 고

[†]Corresponding author
E-mail: shhuh12@gmail.com

© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

온고습 전압인가 시험(Biased Highly Accelerated Stress Test)을 통하여 발생 가능한 불량 메커니즘을 관찰, 해석하였고, 온도, 습도에 의한 가속 계수(Acceleration factor)를 산출하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 시편은 미세 회로를 갖는 6층 반도체용 인쇄회로기판으로 한 쌍의 인접한 전극을 선정하였다. 선정된 전극은 13 μm 스페이스 간격을 갖고, 서로 인접, 평형하며, 한 시편에서 한 쌍의 전극을 시험 하였다. 인쇄회로기판의 표면처리로는 무전해 니켈과 무전해 금 도금으로 표면 부식을 방지함과 동시에 솔더링성을 부과하였다. 준비된 시편의 온고습 전압인가 시험(biased HAST)을 위하여 다음 조건으로 전처리 레벨 3를(Precondition level 3) 진행하였다. 열사이클 시험(Thermal cycles test, TC/B) $-55^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 에서 5 cycles, 고온고습시험(Thermal Humidity test, TH) $60^{\circ}\text{C}/60\%\text{RH}$ 에서 48시간 유지 후, 260°C 피크온도의 리플로우 시험에서 5회 진행하였다. 전처리가 끝난 시편에 대하여, 전압인가를 위한 연결 단자를 와이어로 솔더링하여 연결하였고, 온고습 전압인가 시험(biased HAST)은 ESPEC社 HAST 챔버와 AMI (Auto Measurement Ion-migration) 저항 실시간 측정(In-situ measurement) 장치로 시험하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 ESPEC社 HAST 챔버와 AMI 측정기를 나타내었다. 온고습 전압인가 시험(biased HAST) 조건은 Table 1과 같이 $130^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 와 $135^{\circ}\text{C}/90\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 로, 시편 수량은 15개, 전수 불량 발생할 때까지 시험 진행하였다. 산업계에서 인쇄회로기판에서의 고장의 정의는 신호를 전달하는 회로간에 신호간섭을 유발하는 절연저항 $1\times 10^6 \Omega$ 이하인 경우를 지칭하며,³⁾ 본 연구에서도 불량 관정을 $1\times 10^6 \Omega$ 이하로 하여 불량을 집계, 분석하였다.

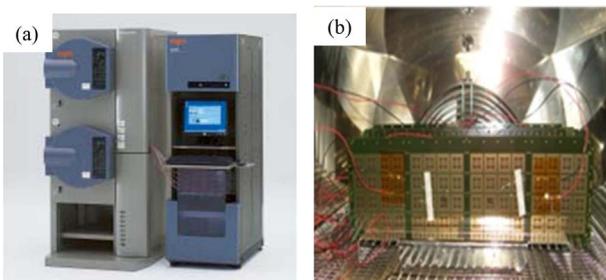


Fig. 1. Biased HAST system (a) consists of auto measurement system and HAST chamber, and specimens (b) for biased.

불량 분석을 위하여 가공 및 미세 조직 관찰은 아르곤(Ar) 이온 단면가공장치(TIC 3x, Germany)와 집속이온빔 가공관찰장치(FIB, Quanta200, Netherlands)로 단면가공 후, 주사전자 현미경(FE-SEM, Nova200, FEI, Netherlands)와 에너지분산 X선분광기(Supra 40VP, Germany)를 이용하여 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 $130^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 조건에서 온고습 전압인가 시험(HAST)을 진행하면서 저항 실시간 측정(In-situ measurement)된 결과를 나타냈다. 5개 시편에서의 저항값 측정 결과로써, 200시간 이후 평가에서 저항값의 감소가 순간적으로 발생하여 280시간 이후에서 불량 저항값인 $1\times 10^6 \Omega$ 이하로 저항값이 떨어지는 것을 알 수 있다. 즉, 280시간 이후에서 불량이 발생하였다. 이러한 불량 저항값 결과를 토대로 수명분포를 와이ابل 분포로 Fig. 3에 나타내었다. $130^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 시험조건에서의 형상 모수는 16.0436, $135^{\circ}\text{C}/90\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 에서의 형상 모수 7.8316의 수명분포를 나타내었다. 누적고장률 63.2%에 해당되는 척도 모수에 있어서는 $130^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 에서 411시간, $135^{\circ}\text{C}/90\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 에서 202시간으로 온도/습도 스트레스 가속에 의해 짧아지는 것으로 나타났다. 가속 계수(acceleration factor, AF)를 산출하기 위해서 평균 수명을 이용하는 방법과 IPC-TM650에서 제시하는 Peck 법칙을 이용하는 방법이 있다.^{3,8,9)} 먼저 평균 수명을 이용하여 가속 계수를 구하는 방법은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\text{AF(HAST)} = \frac{\text{mean lifetime}(\text{test2})}{\text{mean lifetime}(\text{test1})} \quad (1)$$

여기서 mean lifetime (test1)은 가속된 test1에서의 시험되는 시간 동안 50% 고장이 발생하는 평균 수명이며, mean lifetime (test2)는 정상조건(test2)에서의 시험되는 시간 동안 50% 고장이 발생하는 평균 수명을 나타낸다. Fig. 3에서의 와이ابل 분석에서 구한 $130^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 시험조건에서의 평균 수명은 402.5시간, $135^{\circ}\text{C}/90\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 시험조건에서의 평균 수명은 193.6시간이었다. 결론적으로 가속 계수(AF)는 2.079 값을 나타내었다. 즉, $130^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 조건 대비 $135^{\circ}\text{C}/90\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 조건에 의한 가속은 2.079배임을 알 수 있다. 또 다른 방법인 Peck 법칙을 사용하여 구하는 방법은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

Table 1. Target space between two nets, biased HAST condition and sample size for each DOE condition

Sample condition	Test condition			Sample size
	Space between two nets	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Relative humidity (%)	
13 μm	130	85	3.3	1 pair of nets/unit \times 15 unit
13 μm	135	90	3.3	

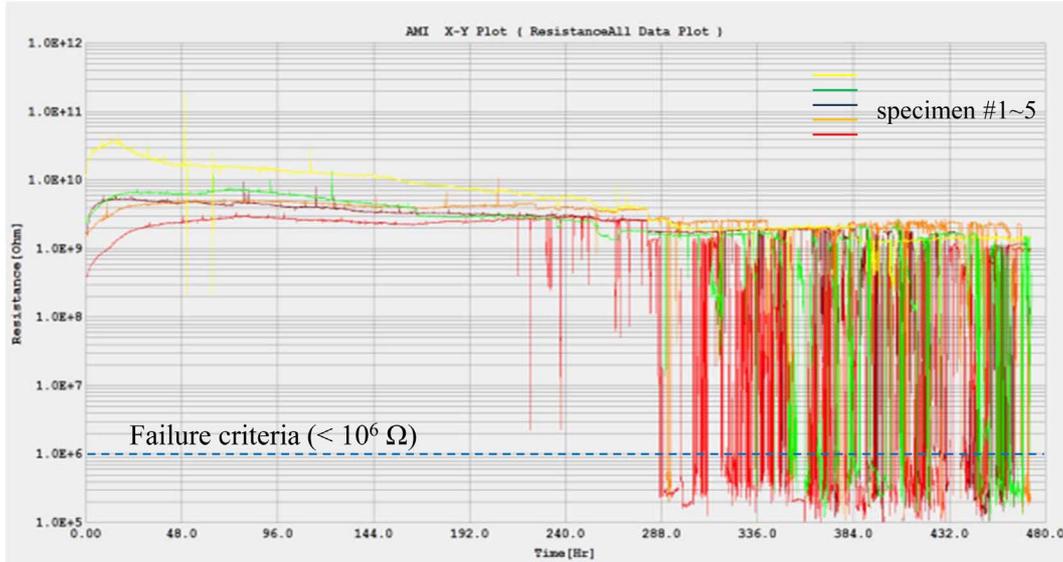


Fig. 2. In-situ resistance plots of each specimen during 130°C/85%RH/3.3 V applied HAST test.

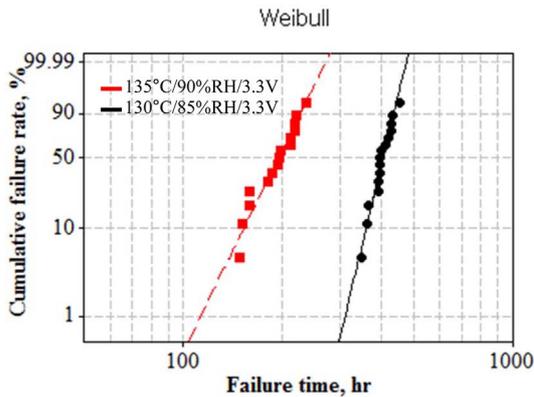


Fig. 3. Weibull plots of specimens with 13 μm spacing as a function of biased HAST conditions. Red line and black line represents 135°C/90%RH/3.3V and 130°C/85%RH/3.3V biased HAST condition, respectively.

$$AF(\text{Peak's law}) = \left(\frac{RH(\text{test2})}{RH(\text{test1})} \right)^{-1} \times \frac{V(\text{test1})}{V(\text{test2})} \times \exp \left[\left(\frac{Ea}{k} \right) \times \left(\frac{1}{T(\text{test2})} - \frac{1}{T(\text{test1})} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 test1과 test2는 가속시험 조건과 정상시험 조건이며, RH는 상대 습도율(%), V는 인가전압(voltage), T는 절대온도(K)를 나타낸다. 또 n은 상수, Ea는 활성화 에너지, k는 볼츠만 상수를 나타내며, 본 연구에서는 기존 연구자들의 데이터 값을 활용하여 n은 2.7(알루미늄 부식), Ea는 1.0 eV(반도체 일렉트로마이그레이션), k는 8.62×10^{-5} eV/K를 사용하였다.^{6,7,9-11)} Peck 법칙에 의해 계산된 가속 계수(AF)는 1.167로 계산되었으며, 이는 평균 수명 비로 구한 가속 계수(AF) 보다 작은 가속 계수 값을 나타내었다. Peck 법칙을 이용한 가속 계수(AF) 계산에는 많은 인용데이터가 사용되었으며, 여기에 사용된 데이터는 반도체 IC용 데이터로 인쇄회로기판에는 차이가 있을 것으로 생각된다. 이에 비해 평균 수명 비에 의한 가속 계수(AF) 산출은 본

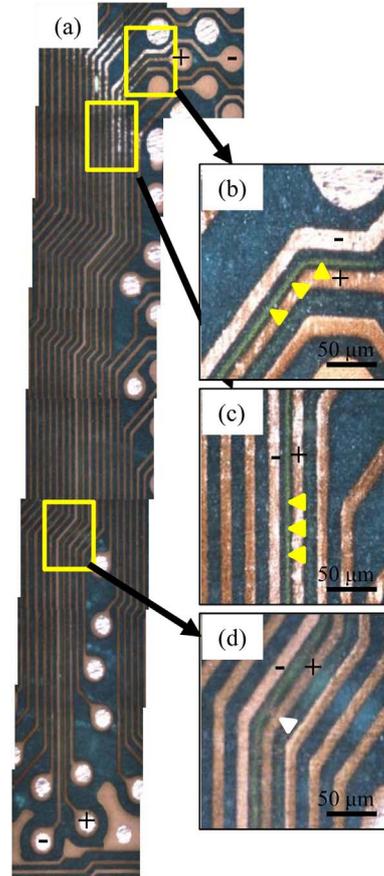


Fig. 4. Plane view optical images of specimen after 130°C/85%RH/3.3V biased HAST test for 278 hrs: (b, c, d) optical images are magnified in (a).

연구 실험데이터로 산출하여 신뢰도가 높지만, 추가로 시험 조건의 다양성(3조건 이상)과 형상 변수의 동일성(가속성)여부에 따른 추가 실험이 필요하다고 생각된다.

Fig. 4는 130°C/85%RH/3.3V 시험조건으로 278시간 후, 불량 발생한 시편의 평면 광학현미경 사진이다. HAST 시

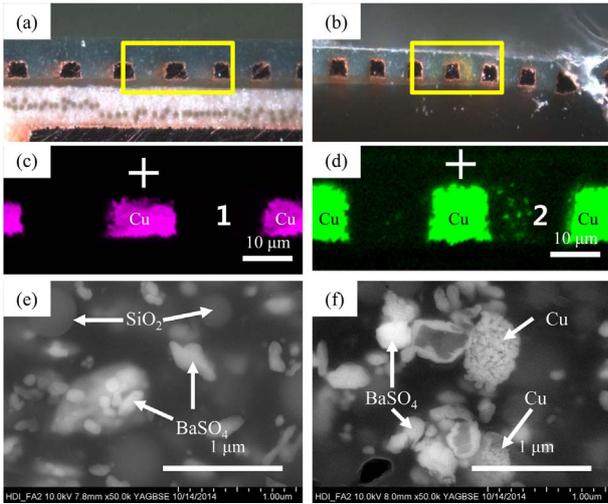


Fig. 5. Vertical view optical images (a, b), EDX Cu element mapping images (c, d), and SEM images (e, f) of specimen after 130°C/85%RH/3.3V biased HAST testing for 48 hrs (a, c, e) and 278 hrs (b, d, f): (c, d) are analyzed in rectangular area of (a, b) using EDX. (e, f) are magnified in 1 and 2 area of (c, d).

험 진행한 한 쌍의 전극을 확대한 사진(b, c, d)에서 (+)전극 주위에 노란 삼각형으로 표시한 푸른색의 띠가 균일하게 분포하고 있는 것을 관찰할 수 있으며, Fig. 3(d)에서 흰 삼각형으로 표시한 부분에 수지상(dendrite)으로 (-)전극과 (+)전극의 연결된 부분을 관찰할 수 있다. HAST 시험에서 불량 발생 전과 후의 시편을 비교 분석하기 위하여 130°C/85%RH/3.3V 시험조건 48시간 경과한 시편과 278시간 경과한 시편의 단면 분석을 진행한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 단면 광학현미경 사진으로 전압인가 전극

과 주위 전극과의 차이점은 발견되지 않았으며, Fig. 5(c)는 전압인가 전극에 대한 EDX 분석에 의한 Cu 맵핑 결과를 나타내었다. 전극 주위의 솔더리지스트(에폭시 계열 절연재)에서의 Cu 성분은 검출되지 않았으며, Fig. 5(c)에서 1 부분을 주사전자 현미경(이하 SEM)을 통해 확대한 관찰 사진(Fig. 5(e))에서도 Cu는 미 검출되고 직경 1 μm 이하의 구형(sphere) SiO₂와 플레이크형(flakes) BaSO₄ 필러(filler)가 관찰되었다. 반면에 278시간 HAST 시험한 시편의 단면 분석 결과에서, Fig. 5(b)의 단면 광학현미경 사진에서는 (+)전극 주위에 노란 띠가 관찰되었으며, Fig. 5(d)의 EDX Cu 맵핑 결과에서는 (+)전극 주위에 Cu 성분이 흩뿌려진 점 형태로 검출되었다. Fig. 5(f)는 (d)의 2 부분을 SEM 확대 사진으로써, BaSO₄ 필러 주위에 1 μm 이하의 다공성 Cu가 관찰되었다. 가속 시험조건에서의 불량 현상 관찰을 위하여 135°C/90%RH/3.3V 시험조건에서 HAST 평가를 211시간 진행한 시편의 광학현미경 사진과 FIB 사진을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 평면 광학현미경 사진으로 Fig. 5와 마찬가지로 (+)전극 주위에 푸른 띠가 형성된 것을 관찰할 수 있다. 단면 관찰을 위하여 FIB 에칭을 통하여 단면 SEM사진을 Fig. 6(b)에 나타내었으며, (-)전극과 (+)전극 사이의 변화를 확인하기 위하여 1, 2, 3 부분의 확대 SEM 관찰을 진행하였다. (+)전극 주위에는 점 형태의 Cu가(노란 화살표) 방사형을 이루고 있는 것이 관찰되었으며, (-)전극 주위에서는 수지상 형태의 Cu가 관찰되었으며, 이는 (+)전극의 Cu와 달리 2 μm 이상의 Cu 덩어리로, 미세 조직에서도 차이가 보였다.

Fig. 7은 (-)전극 주위의 SEM 분석을 추가 진행하였으며, Fig. 7(a)의 1 부분 확대 사진과 EDX 분석 결과(Fig. 7(b))에서는 2 μm 정도의 Cu 덩어리로, 2 부분 확대 사진에서는

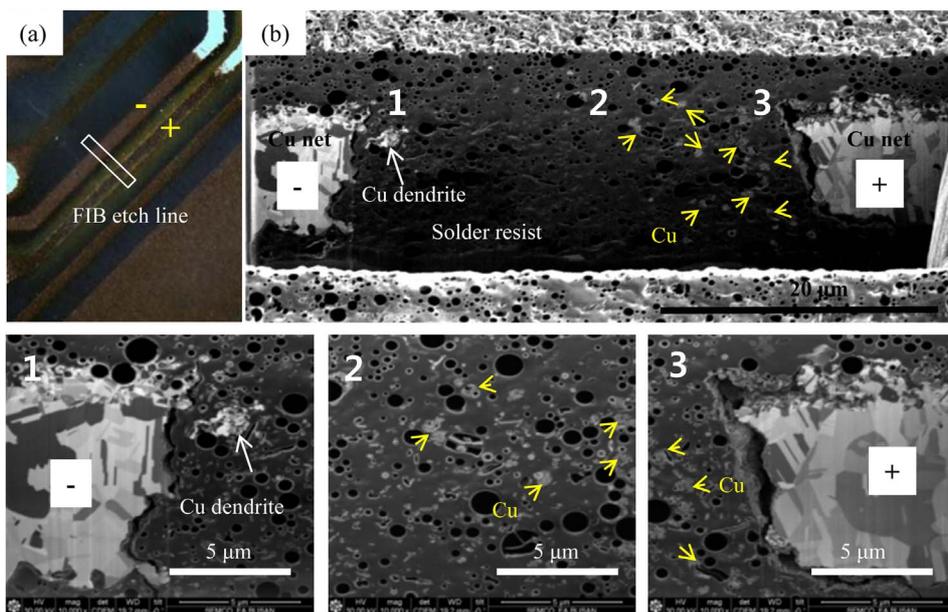


Fig. 6. Plane view optical image (a), FIB image (b), and magnified FIB images (1, 2, 3) of specimen with 13 μm spacing after 135°C/90%RH/3.3V biased HAST testing for 211 hrs: White line between two nets (+ and -) in (a) was etched by FIB, and 1, 2, 3 FIB images are magnified in (b).

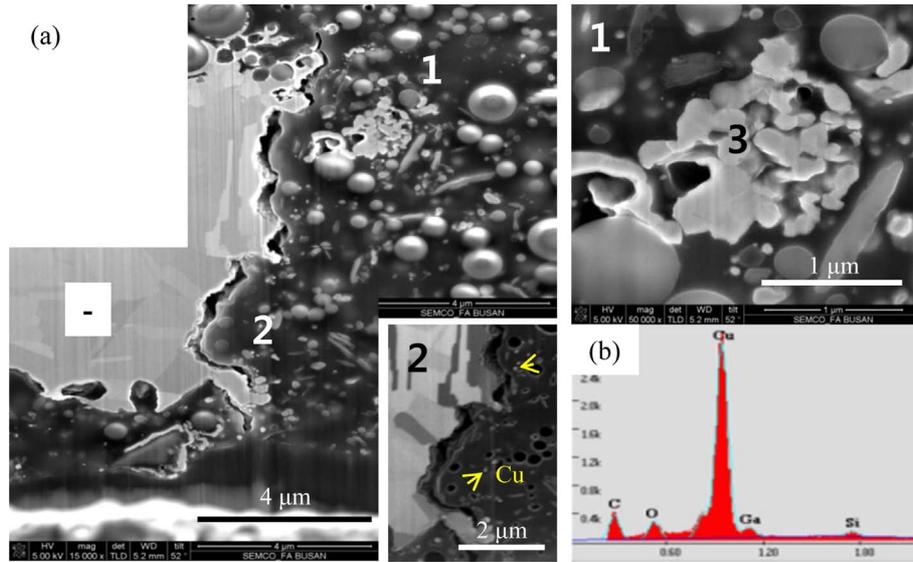


Fig. 7. Vertical view FIB images (a) are magnified in near cathode in Figure 5 (1): (1, 2) are magnified in (a), and EDX analysis (b) is analyzed in (3).

(-)전극 주위에서도 1 μm 이하의 점 형태 Cu도 검출되었다. 이는 (+)전극의 방사형 Cu 이온(노란 화살표)이 (-)전극까지 이동한 것으로 사료된다. Fig. 8은 (+)전극의 확대 SEM 사진으로, (+)전극 주위로 방사형으로 Cu가 존재하였으며, Fig. 8(a)의 1 부분을 확대하여 형상 및 EDX 분석

을 진행하였다. 구형의 SiO₂ 필러 주위에 Cu가 존재(2부분)를 확인할 수 있다. 1 부분의 SEM 사진에서 3 부분을 추가 관찰하기 위하여 Fig. 9에 10만배 SEM 사진을 나타내었다. SiO₂ 필러 주위에 Cu가 꽃이 핀 것처럼 퍼 있으며, 이는 콜로이드 형태의 Cu_xO나 Cu(OH)₂로 생각되며, Franz 등은

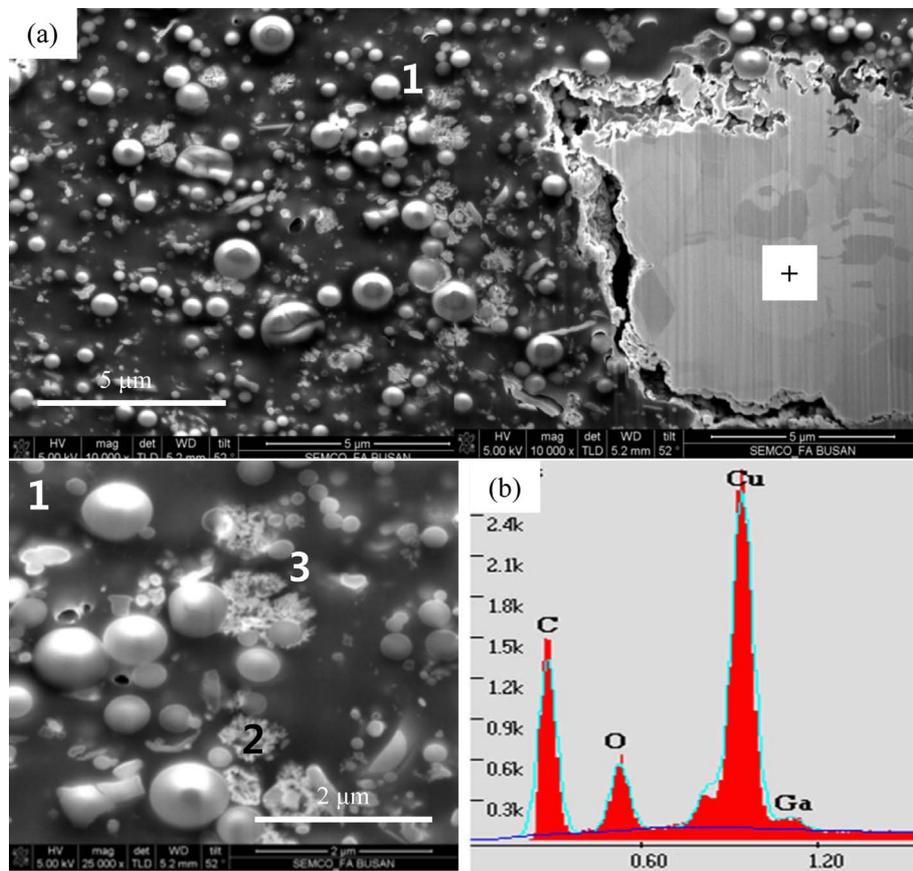


Fig. 8. Vertical view FIB images (a) are magnified in near anode in Figure 5 (3): FIB image (1) is magnified in (a), and EDX analysis (b) is analyzed in (2).

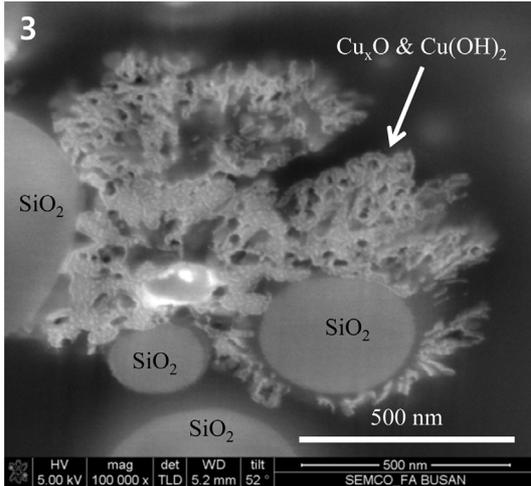


Fig. 9. High resolution SEM image is magnified in Figure 7 (3): $\text{Cu}_x\text{O}/\text{Cu}(\text{OH})_2$ and SiO_2 are observed in this image.

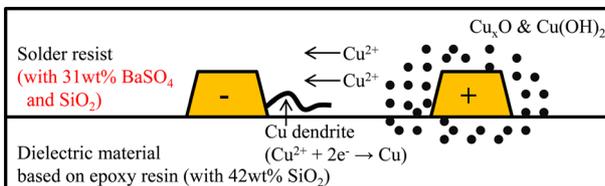
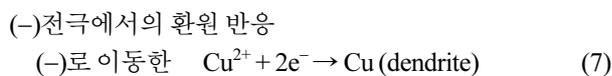
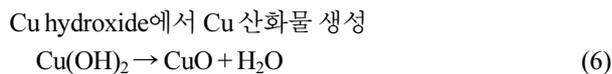
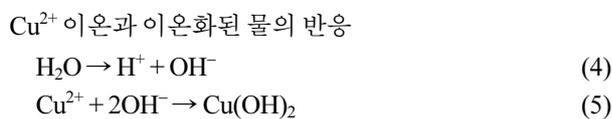
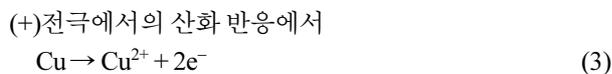


Fig. 10. Schematic of reaction and reaction products for organic printed circuit board during biased HAST test.

폴리머 내에서의 금속확산에서 Cu^{2+} 이온이 이온화된 물 분자와 반응으로 콜로이드 형태의 Cu 산화물이 생성된다고 보고하였다.^{12,13)} Fig. 9에서 보면 솔더리지스트가 고온 고습 상태를 유지하면 내부 친수성 SiO_2 필러를 통한 Cu^{2+} 이온 확산이 용이하여 Cu 산화물의 생성도 용이한 것으로 사료된다.¹³⁾

Fig. 10은 전압인가 HAST 시험중의 시편에서 발생하는 현상을 모식도로 나타내었다. 다음은 (+)전극과 (-)전극에서의 산화 반응과 환원 반응을 나타내었다.



(+)전극에서 Cu의 산화 반응이 발생하여 Cu 콜로이드 형태의 Cu 산화물이 생성된다. 또 흡습에 의한 Cu^{2+} 이온들은 전기장에 의해 (-)전극으로 이동되어 가고 (-)전극에서 Cu의 환원 반응에 의해 수지상의 Cu 석출물이 생성된다.

이 수지상의 Cu 석출물이 (-)전극과 (+)전극의 전기 도통을 유발하여 불량 발생으로 사료된다.

4. 결 론

인쇄회로기판의 고온고습 전압인가(Biased HAST) 시험을 통하여 가속 계수와 불량 메커니즘을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) $130^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 시험조건 of 척도 모수(누적고장을 63.2%)는 411시간, $135^{\circ}\text{C}/90\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 시험조건 of 척도 모수는 202 시간으로 계산되었다.

(2) $130^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 대비 $135^{\circ}\text{C}/90\%\text{RH}/3.3\text{V}$ 시험조건에서의 평균 수명에 의한 가속 계수(AF)는 2.079로 얻어졌다.

(3) (+)전극 주위에서는 콜로이드 형태의 Cu 산화물들이 방사형으로 분포하였고, (-)전극 주위에서는 수지형태의 Cu가 관찰되었다. 이는 (+)전극의 산화 반응에 의한 Cu^{2+} 이온과 수분 증기(moisture vapor) 생성과, (-)전극의 환원 반응에 의한 Cu^{2+} 이온의 수지상 Cu로의 환원으로 사료된다.

References

1. B. I. Noh, J. W. Yoon, W. S. Hong and S. B. Jung, "Evaluation of electrochemical migration on flexible printed circuit boards with different surface finishes", J. Electronic Materials, 38, 6 (2009).
2. C. Zhang, P. Yalamnchili, M. A. Sheikley and A. Christou, "Metal migration in epoxy encapsulated ECL devices", Microelectron. Reliab., 44, 1323 (2004).
3. Y. H. Chun and L. J. Kwon, "Accelerated life test and data analysis of the silver through hole printed wiring board", J Korean Soc Qual Manag., 25(2), 15 (1997).
4. K. J. Lee, K. S. Kim and K. Saganuma, "Electro-migration phenomenon in flip-chip packages", J. Microelectron. Packag. Soc., 17(4), 11 (2010).
5. K. Saganuma, "Tin whisker growth in vacuum thermal cycling", Presented at 2010 TMS Annual Meeting & Exhibition, February 14-18, Seattle.
6. W. S. Hong, S. B. Jung and K. B. Kim, "Analysis method of metallic ion migration", Journal of KWS, 23, 32 (2005).
7. H. Tanaka and K. S. Kim, "Introduction of reliability test technology for electronics package", J. Microelectron. Packag. Soc., 19(1), 1 (2012).
8. W. J. Choi, S. H. Yoo, H. S. Lee, M. S. Kim and J. K. Kim, "Effects of hardeners on the low-temperature snap cure behaviors of epoxy adhesives for flip chip bonding", Kor. J. Mater. Res., 22, 454 (2012).
9. IPC-TM-650, Assessment of Susceptibility to Metallic Dendritic Growth: Uncoated printed wiring (Northbrook, IL: The Institute for Interconnection and Packaging Electronic Circuits, 1985).
10. K. S. Kim, K. J. Lee, K. Saganuma and S. H. Huh, "Effect of Cl content on interface characteristics of isotropic conductive adhesives/Sn plating interface", J. Microelectron. Packag. Soc., 18(3), 33 (2011).

11. W. S. Hong, C. M. Oh, N. C. Park, B. S. Song and S. B. Jung, "Reliability assessment for electronic assemblies with electrical and electrochemical properties measurement", *Journal of KWJS*, 25, 118 (2007).
12. C. H. Hare, "Paint film degradation mechanism and control", *Society for Protective Coatings*, (2002).
13. F. Franz, W. Ralf and T. Axel, "Diffusion of metals in polymers", *Materials Science and Engineering*, R22, 1 (1998).