

공정조성 SnPb 솔더에 대한 실시간 Electromigration 거동 관찰

김오한 · 윤민승¹ · 주영창¹ · 박영배*

안동대학교 신소재공학부, 서울대학교 재료공학부¹

In-situ Observation of Electromigration Behaviors of Eutectic SnPb Line

Oh-Han Kim, Min-Seung Yoon¹, Young-Chang Joo¹ and Young-Bae Park*

School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

¹School of Materials Science and Engineering, Seoul National University Seoul 151-742, Korea

초 록: 공정조성의 SnPb 솔더 선형시편에서 electromigration 현상을 실시간 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 공정조성 SnPb솔더시편에 대한 electromigration 실험은 $\times 10^4 \text{A/cm}^2$, 90°C에서 실시하였다. 주사전자현미경 챔버 내에서 진행되는 electromigration 실험 동안 음극의 보이드 형성과 양극의 힐록 성장을 실시간으로 관찰하였다. 음극에서 일어나는 보이드 크기를 실시간 관찰한 결과, 공정조성 SnPb 솔더의 electromigration 거동은 보이드 형성 전에 가지는 잠복기의 존재를 명확히 알 수 있었고, 본 결과는 electromigration 거동으로 인한 플립칩 솔더 범프의 보이드 생성에 대한 잠복기와 관련이 있었다.

Abstract: *In-situ* electromigration test was carried out for edge drift lines of eutectic SnPb solder using Scanning Electron Microscopy (SEM). The electromigration test for the eutectic SnPb solder sample was conducted at temperature of 90°C and the current density of $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$. Edge drift at cathode and hillock growth at anode were observed *in-situ* in a SEM chamber during electromigration test. It was clearly revealed that eutectic SnPb solder lines has an incubation stage before void formation during electromigration test, which seemed to be related to the void nucleation stage of flip chip solder electromigration behaviors.

Keywords: *in-situ* scanning electron microscopy, eutectic SnPb, electromigration, incubation stage, flip chip

1. 서 론

플립칩 패키징기술은 칩의 많은 입/출력 단자와 접촉 패드 사이를 솔더범프를 사용하여 실장하는 기술이다¹⁾. 따라서 기존의 와이어본딩 및 Tape-Automated Bonding이 넓은 패키지 면적을 갖는 것에 반해 플립칩본딩은 칩과 패키지를 솔더범프로 직접 연결하므로 보다 많은 트랜지스터를 집적할 수 있다²⁾. 또한 칩과 모듈을 잇는 연결을 솔더 볼

의 형태로 사용함으로써, 신호의 진행거리와 비례해서 증가되는 신호지연의 감소와 더불어 패키지의 소형화를 이룬다^{2,3)}. 이러한 솔더범프는 칩의 고집적화와 고성능화에 함께 입/출력 단자의 수가 대단히 많아짐에 따라 범프의 크기와 범프간 거리는 줄어드는 추세이다⁴⁾. 그에 따라 칩에 흐르는 작동전류는 증가하며, 직경이 작아진 솔더범프에는 상대적으로 높은 전류 밀도가 적용되므로, 반도체 배선의 전기적 문제의 핵심이 되는 electromigra-

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

tion 현상이 발생하여 전자부품의 신뢰성에 큰 문제를 준다^{3,5)}.

Electromigration에 의해 발생하는 배선 파괴의 원인은 배선에 전류가 가해졌을 때 배선 내의 수많은 전자들이 음극에서 양극 방향으로 이동하여 배선을 이루고 있는 금속 원자들과 충돌할 때 발생하는 운동량의 교환에 의해서다³⁾. 전자에 의해 발생된 운동량이 금속원자와 교환에 의해 원자는 전자 이동 방향과 동일한 방향으로 움직여서 음극 쪽에서는 원자의 고갈에 의한 보이드(void)가 형성되고 양극 쪽에서는 이동된 원자의 퇴적으로 인해 힐록(hillock)이 생성된다^{3,6,7)}. 실제 소자에서 보이드는 회로의 단선을 유발하며, 힐록은 회로의 단락을 발생시킨다⁸⁾.

2004년 플립칩 본딩에 사용되는 솔더범프의 직경은 125 μm 로 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 의 칩에 연결할 수 있는 솔더 범프의 개수는 2000개였으나, 가까운 미래에는 6000여 개 이상의 솔더 범프를 연결할 수 있게 될 것으로 예상하고 있다.²⁾ 집적회로 칩에 흐르는 전류 수준 또한 현재 0.2A이지만 몇 년 후에는 0.4A 이상으로 증가될 것으로 예측하며, 전류밀도는 $1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 이상으로 증가될 것이다²⁾. 집적회로 칩의 동작 전류의 상승은 동작온도 및 전류밀도의 상승을 가져오며, 결과적으로 낮은 용융점을 갖는 솔더 합금에서 electromigration 현상의 가속

화로 전자부품의 신뢰성에 중요한 인자로 작용할 것으로 전망하고 있다⁴⁾. 플립칩 솔더의 electromigration은 최근 미국의 반도체 산업체, 대학 및 연구소를 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있으나, 국내에서는 활발히 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 그리고 기존 연구는 범프 구조에 전류를 흘려서 발생하는 electromigration의 현상적인 연구가 중심이 되고 있다. 따라서 범프 구조의 집적회로 칩과 패드간 접합 지역에서 일어나는 electromigration뿐만 아니라, joule 가열(joule heating), 전류 집중(current crowding), 솔더와 금속하부층(underbump metallurgy)간의 금속간화합물(intermetallic compound) 생성 및 변화 등으로 순수한 electromigration 현상의 규명이 어렵다. 따라서 순수 electromigration 현상에 대한 기구 규명 측면에서 기존 연구는 미흡한 측면이 많으므로, 63Sn-37Pb 솔더 합금 재료에 대해 순수한 electromigration에 의한 손상기구를 명확히 규명하는 연구가 필요하다⁹⁾.

본 연구는 electromigration 현상에 대한 기구 규명이 용이하도록 주사전자 현미경을 이용한 실시간 electromigration 거동 분석으로 진행되었다. 범프구조에서 발생하는 문제를 최소로 하기 위하여 63Sn-37Pb 솔더 합금을 *in-situ* electromigration 실험이 용이한 박막형 선형 시편으로 제작하였다. 전류밀도 $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, 90°C 의 조건으로 주사전

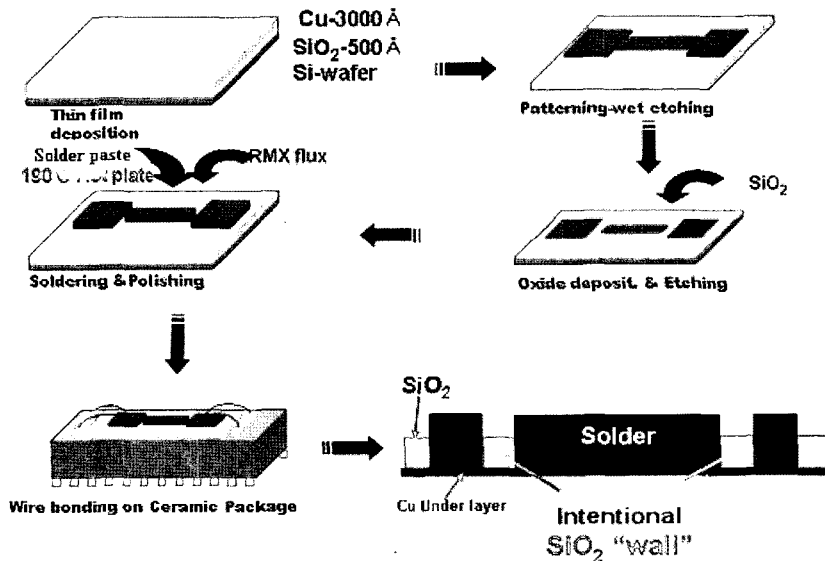


Fig. 1. Fabrication processes of 63Sn-37Pb trench-type sample for electromigration test.

자현미경을 이용하여 63Sn-37Pb 솔더 합금의 electromigration 거동을 실시간으로 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구를 위한 선형시편은 Fig. 1과 같은 공정으로 제작하였다. P형<100>Si 웨이퍼 위에 Cu를 3000Å 증착 후, 표준 반도체 공정을 통하여 길이 1000 μm, 폭 100 μm의 선형구조와 전류를 인가할 수 있는 패드를 제작하였다. Electromigration 실험 동안 발생하는 라인과 패드간의 원자 공급 효과를 없애기 위해서 SiO₂ 절연층을 화학기상증착(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)으로 1 μm 증착 후, 라인과 패드를 분리하였다. 63Sn-37Pb 솔더 페이스트는 제작된 Cu 패드의 라인과

패드에 얇게 도포하였으며, 190°C로 2초간 리플로우 후에 연마하여 높이 4 μm의 선형시편을 제작하였다. 선형시편은 주사전자 현미경 내에 삽입할 수 있도록 고안된 홀더에 부착하여 볼 타입 Au 와이어본딩 후 진공 챔버 내에서 100°C로 4시간 동안 열처리하였다. 시편에 인가되는 전류밀도는 솔더 라인과 Cu 패드를 병렬 저항으로 가정하여 계산하였다.

Fig. 2(a)와 같이 실시간으로 electromigration 거동을 분석하기 위해 주사전자현미경(Hitachi 2500C)챔버 내에서 온도와 전류를 인가할 수 있는 히터 홀더를 제작하였다. Fig 2(b)와 같이 시편의 본딩 패드와 세라믹패키지 간의 전기적 연결은 볼 타입 Au 와이어본딩을 하였다. 63Sn-37Pb 솔더 라인의 electromigration 실험은 $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$, 90°C 조건에서 진행하였으며, 시편의 음극과 양극을 매 시간 주사전자 현미경으로 촬영하였다.

Electromigration 실험 후 음극에서 일어난 보이드 크기는 image analyzer로 시간에 따라 측정하였으며, 주사전자 현미경과 Energy Dispersive X-ray Spectrometer(EDS)로 음극과 양극에서 일어난 미세구조의 변화 및 조성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3(a)은 $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$, 90°C에서 30시간 동안 electromigration 실험을 실시한 선형시편의 주사전자현미경 Backscattered Electron 사진이다. 음극지역은 electromigration에 의한 물질이동으로 보이드가 생성되었으며(Fig. 3(b)), 양극지역은 이동한 원자의 퇴적으로 힐록이 형성되었다 Fig. 3(b)와 (c)의 작은 원은 EDS 분석지점이다.

Fig. 4는 시편의 음극과 양극의 electromigration에 의한 생성물(Fig. 3(b), (c)의 원)을 EDS로 분석한 것이다. EDS 분석은 사진의 작은 원을 초점으로 하였다. EDS 조성 분석 결과 Fig. 4(a) edge 이동이 일어난 음극 지역은 Cu₆Sn₅의 금속간 화합물로 나타났으며, 양극의 이동된 원자 퇴적에 의해 형성된 힐록은 Fig. 4(b)의 98 wt% Sn-2% Pb 힐록, Fig. 4(c)는 90 wt% Pb-10 wt% Sn 힐록이다. 또한 기 보고¹⁰⁾와 유사하게 Sn과 Pb의 혼합 힐록도 일부 발견되었다.

Fig. 5는 전류밀도 $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$, 90°C에서 elec-

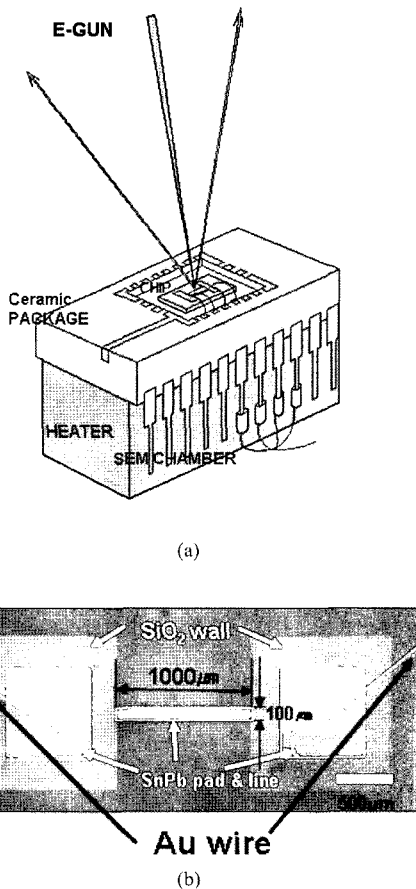


Fig. 2. (a) *in-situ* electromigration test stage which has the chip carrier with a sample plugged into the ceramic socket, (b) SEM image of wire bonded sample.

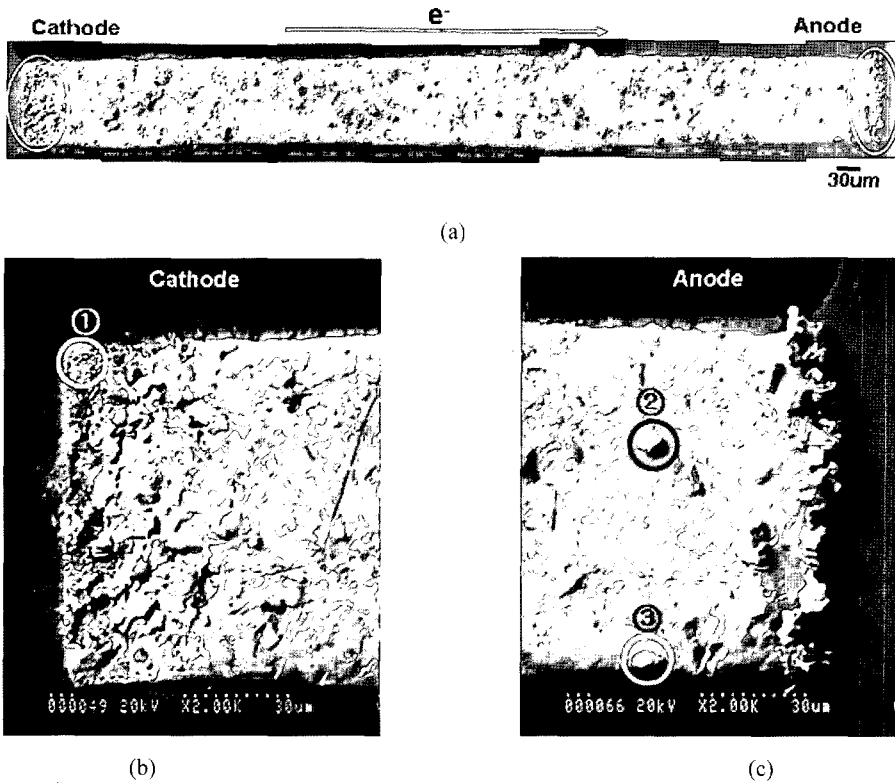


Fig. 3. SEM images of (a) edge drift stripe-type-sample after about 30hours at 90°C under current density of $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ (b) cathode side (c) anode side. 1, 2, 3 in circle are EDS analysis point.

tromigration 실험을 진행하며, SnPb 솔더 선형 시편의 양단의 변화를 주사전자현미경으로 실시간 촬영한 Secondary Electron 사진이다. Fig. 5(a)-(d)는 음극 지역의 보이드 이동을 촬영한 것이며, Fig. 5(e)-(h)는 양극의 힐록 성장을 촬영한 것이다. Fig. 5(b)와 같이 전류를 인가한 후 4시간까지 음극의 보이드 형성은 관찰되지 않았으며, Fig. 5(c)처럼 6시간이 지난 후부터 선형 시편의 보이드 형성이 관찰되었다. 전류인가가 6시간 이후부터는 보이드 크기 증가가 시간에 거의 비례하여 관찰되며, Fig. 5(d)와 같이 26시간이 지난 후에는 선형 시편의 음극 끝 부분은 전자 이동 방향으로 솔더가 완전히 이동한 것이 확인되었다. Fig. 5(f)-(h)와 같이 양극 edge 힐록 성장은 electromigration 실험 동안 지속적으로 성장하는 것이 관찰되었다.

Fig. 6은 전류밀도 $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, 90°C에서 실험을 실시한 시편의 음극에서 발생한 보이드 생성 및 성장거리를 Fig. 5의 사진으로부터 측정하여 나타

내었다. 보이드 생성 및 성장은 시편과 SiO_2 절연층 경계 지역의 잔류물이 아닌 솔더 경계선 이동을 기준으로 하였다. Fig. 5, 6을 비교 분석하면, electromigration에 의한 보이드 생성은 전류인가 4시간 동안은 관찰되지 않았으며, 4시간 후부터 생성된 보이드의 성장 거리는 시간과 비례하여 증가하는 것으로 확인되었다.

이 결과를 통해 박막 선형 63Sn-37Pb 솔더 합금 시편의 electromigration에 의한 파괴는 보이드 생성에 의해 발생하며, electromigration에 의한 보이드 생성은 잠복기가 있음을 판단하였다.

이러한 SnPb 솔더 합금의 electromigration 잠복기는 Lee¹¹⁾의 솔더 범프시편 실험 결과에서 보고되었다. Lee¹¹⁾는 솔더 범프 단면에 표식을 사용하여 electromigration에 의한 표식 이동이 초기 약 10시간 동안 없었으며, 10시간 이후에는 표식이 시간에 비례하여 이동한다고 하였다. 또한 Choi¹²⁾는 솔더 범프 시편을 이용한 electromigration 실험에

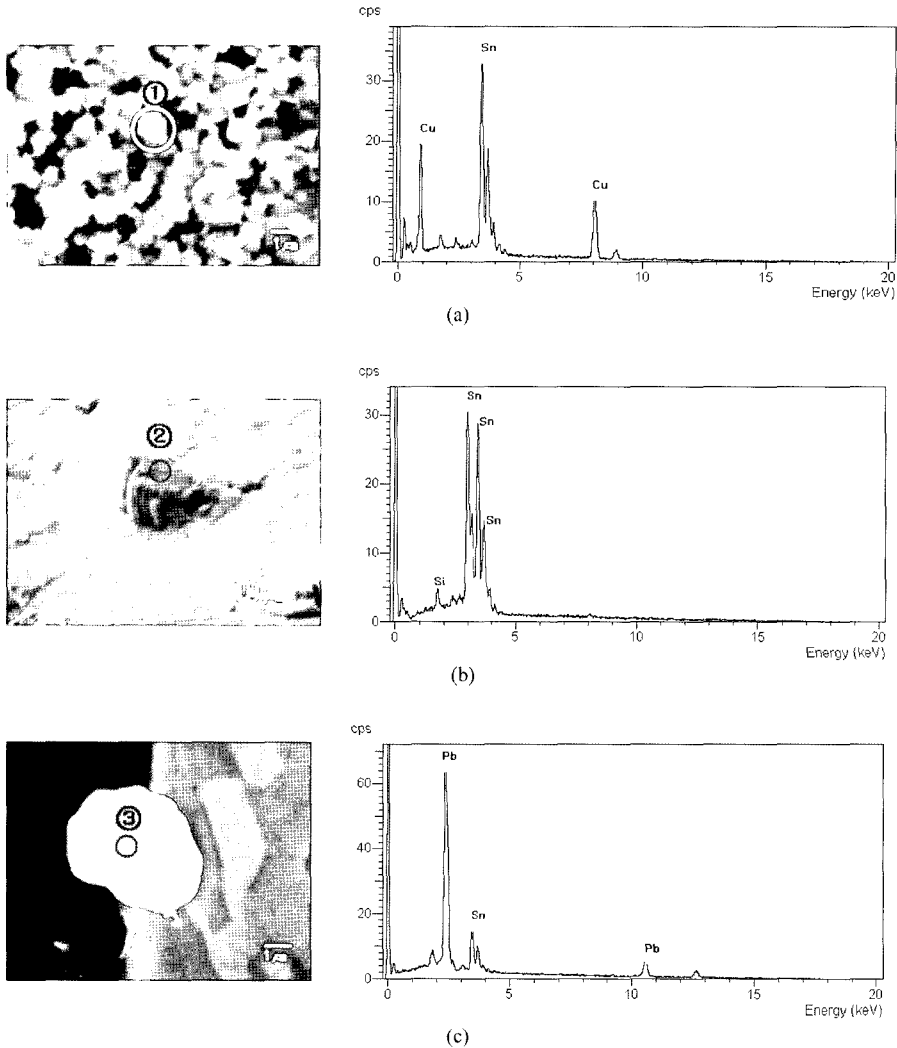


Fig. 4. EDS analysis of 63Sn-37Pb edge drift solder sample at 90°C under current density of $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ for 30 hours. (a) Fig. 3(b)-high magnification of near cathode side, EDS result of Cu_6Sn_6 inter-metallic compound (b) Fig. 3(c)-60° tilted hillock image. Sn hillock from EDS analysis of hillock in anode side (c) Fig. 3(c)-Pb hillock and EDS result.

서 전압의 변화로 잠복기의 존재를 보고했는데, 보이드가 관찰되지 않은 시간 동안은 전압 변화가 거의 없었으나 보이드가 관찰되는 시점에서 전압이 증가하였음을 통하여 잠복기 존재를 보고하였다. Lin¹³⁾은 솔더 범프를 이용한 실시간 electromigration 실험을 통해 전류 인가 후 임계시간 동안 보이드가 관찰되지 않았으며, 보이드가 생성된 뒤에는 급속한 보이드 성장으로 짧은 시간 내에 범프 접합지역이 파괴 되었다고 보고하였다. 그러므

로 보이드 생성 잠복기는 솔더 범프 파괴에 이르는 수명과 신뢰성에 매우 중요한 요인으로 작용한다고 볼 수 있다.

본 연구에서 관찰된 63Sn-37Pb 솔더합금의 electromigration에 의한 보이드 생성 잠복기는 반도체 소자의 배선재료로 사용되는 AlCu 합금에서도 존재한다¹⁴⁾. AlCu 합금에서 잠복기는 Al에 Cu가 고용된 미세조직에서, Al보다 높은 확산속도를 가지는 Cu가 electromigration에 의해 우선 확산이

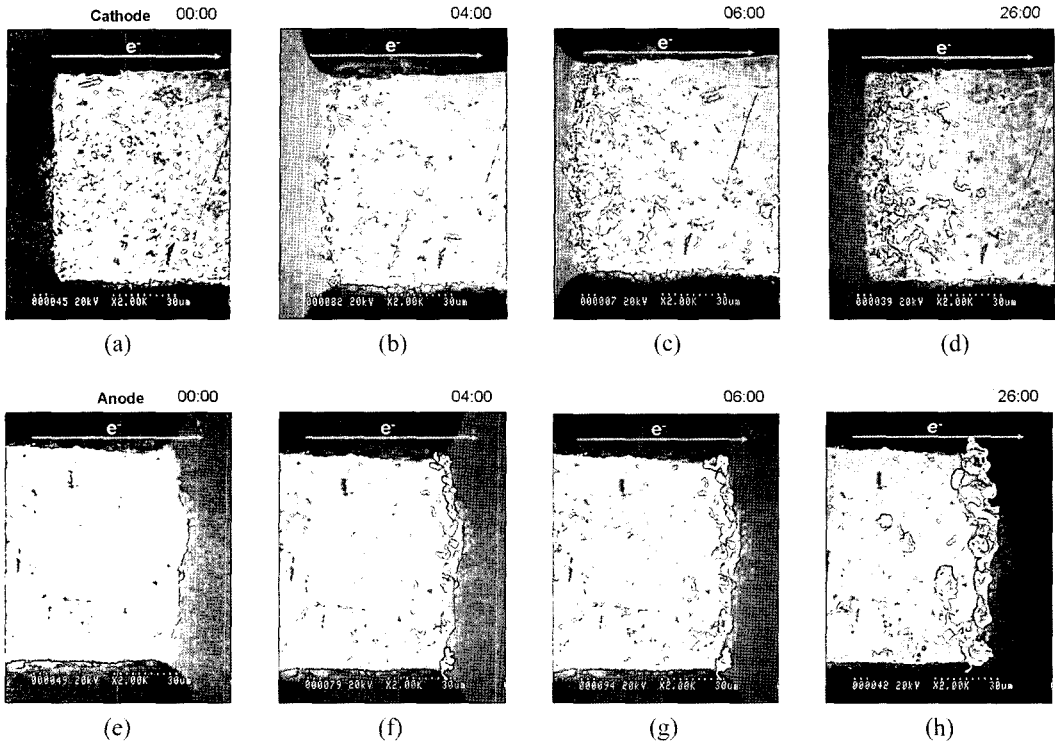


Fig. 5. *in-situ* SEM image at 90°C under current density of $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ for 30 hours. Cathode region images are (a) before electromigration test., (b) after about 4hours, (c) after about 6hours, (d) after about 26hours. Anode region images are (e) before test., (f) after about 4hours, (g) after about 6hours, (h) after about 26 hours.

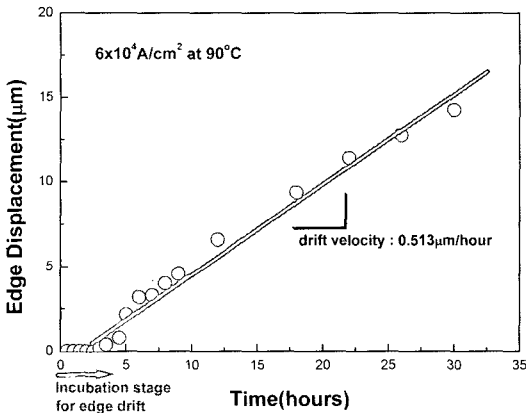


Fig. 6. Edge displacement with test time at 90°C under current density of $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ for 30 hours.

일어나는 것이 원인이 된다¹⁵⁾. 그러나 SnPb의 경우는 Sn-rich 상과 Pb-rich 상이 공정 미세구조를 가지며, electromigration에 의한 일방향 확산이 일어나므로, AlCu 반도체 배선에 존재하는 elec-

tromigration 잠복기와는 발생기구가 다르다. 그렇지만 실시간 분석을 통하여 SnPb의 electromigration에 의한 보이드 생성 잠복기의 존재는 명확하다고 판단된다. 또한 선형시편의 electromigration 거동이 실제 솔더 범프에서의 거동과 유사함을 확인하였으며, 손상기구 규명에 용이하다는 결과를 얻었다.

4. 결 론

본 연구에서는 플립칩 패키지에 사용되는 63Sn-37Pb 솔더 범프를 실시간 분석이 용이한 박막형 선형으로 시편을 제작 후 주사전자현미경을 이용한 실시간 electromigration 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 금속 박막의 electromigration 거동을 주사전자현미경내에서 실시간으로 관찰할 수 있는 실시간 분석 기법을 구축하여 electromigration 실험과 표면 미세구조 관찰을 동시에 할 수 있었다. 간단한

구조의 선형시편은 실제 복잡한 플립칩 구조에서 일어나는 electromigration 현상의 관찰 및 손상기구 규명에 용이하였다.

2. $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$, 90°C 의 조건으로 30시간 동안 Electromigration 실험 후 63Sn-37Pb 선형 시편의 양단 조성을 분석한 결과 음극의 솔더 이동이 일어난 지역은 Cu_6Sn_5 의 금속간화합물만이 잔류하였으며, 양극은 단일 조성에 가까운 Sn힐록, Pb힐록과 Sn과Pb의 혼합 힐록이 생성되었다.

3. 음극지역의 보이드 이동거리를 실시간 측정 한 결과, 63Sn-37Pb 솔더 합금의 electromigration 거동은 $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$, 90°C 조건에서 전류 인가 후 약 4시간 동안 edge 이동이 관찰되지 않았는데, 이는 보이드 생성을 위한 잠복기간으로 판단된다.

4. 63Sn-37Pb 솔더 합금의 electromigration 거동은 선형 시편과 실제 플립칩 솔더 범프가 공통적으로 보이드 생성 잠복기를 가지며, 보이드 생성을 위한 잠복기는 범프의 수명과 연관되는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 전자부품신뢰성 설계기술사업(과제번호:M1040100000405O010000411)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. T. Y. Lee and K. N. Tu, "Electromigration of eutectic SnPb and SnAg3.8Cu0.7 flip chip solder bumps and under-bump metallization", *J. Appl. Phys.*, Vol. 90, No. 9, 3189 (2001).
2. International technology Roadmap for semiconductors 1999 Edition, Semiconductor industry Association (2000).
3. S. W. Lee and T. S. Oh, "Electromigration of Sn-3.5Ag solder Bumps in flip chip package", *J. Microelectronics & Packaging Soc.*, Vol. 10, No. 4, 81 (2003).
4. S. H. Lim, J. H. Choi and T. S. Oh, "Electromigration behavior in the 63Sn-37Pb solder strip", *J. Microelectronics & Packaging Soc.*, Vol. 11, No. 2, 53 (2004).
5. Y. C. Hsu, T. L. Shao and C. Chen, "Electromigration induced failure in SnAg3.8Cu0.7 Solder Joints for Flip Chip Technology." *IEEE Symposium on electronic materials and packaging* (2002).
6. K. N. Tu, J. W. Mayer and L. C. Feldman, "Electronic Thin Film Science", Macmillan Publishing Company, New-York (1992).
7. H. B. Huntington and A. R. Grone, "Current Induced Marker Motion in Gold Wires", *J. Phys. Chem. Solid*, Vol. 20, No. 1/2, 76(1961).
8. R. S. Muller and R. T. Howe, eds., *Microsensors*, IEEE Press, New York (1991).
9. M. S. Yoon, S. H. Lee and Y. C. Joo, *Proceeding of The 2003 Fall Technical Symposium on Microelectronics and Packaging*, "Electromigration characteristics of eutectic SnPb and SnAgCu thin stripe lines", 63 (2003).
10. J. Y. Choi, S. S. Lee and Y. C. Joo, "Electromigration behavior of eutectic SnPb solder", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 41, No.12, 7487 (2002).
11. T. Y. Lee, K. N. Tu, S. M. Kuo and D. R. Frear, "Electromigration of Eutectic SnPb Solder interconnects for Flip Chip technology", *J. Appl. Phys.*, Vol. 89, No. 6, 3189 (2001).
12. W. J. Choi, E. C. C. Yeh and K. N. Tu, "Mean-Time-to-Failure study of flip chip solder joints on Cu/Ni(V)/Al thin-film under-bump-metallization", *J. Appl. Phys.*, Vol. 94, No. 9, 5665 (2003).
13. Y. H. Lin, Y. C. Hu, C. M. Tsai, C. R. Kao and K. N. Tu, "In-situ observation of the void formation-and-propagation mechanism in solder joints under current-stressing", *Acta Mater.*, Vol. 53, 2029 (2005).
14. J. Proost, A. Witvrouw and K. Maex, "Electromigration-induced drift in damascene and plasma-etched Al-Cu., I. Kinetics of Cu depletion in polycrystalline interconnects", *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, No. 1, 86 (2000).
15. J. Proost and K. Maex, "Electromigration-induced drift in damascene and plasma-etched Al-Cu., II. Mass transports mechanisms in bamboo interconnect", *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, No. 1, 99 (2000).