

## 공정조성 SnPb 솔더 라인의 온도에 따른 Electromigration 확산원소의 *In-situ* 분석

김오한<sup>1,3</sup> · 윤민승<sup>2</sup> · 주영창<sup>2</sup> · 박영배<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 신소재공학부, <sup>2</sup>서울대학교 재료공학부, <sup>3</sup>스태츠칩팩 코리아 R&D center

### *In-situ* Analysis of Temperatures Effect on Electromigration-induced Diffusion Element in Eutectic SnPb Solder Line

Oh-Han Kim<sup>1,3</sup>, Min-Seung Yoon<sup>2</sup>, Young-Chang Joo<sup>2</sup>, and Young-Bae Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>3</sup>Hybrid FCBGA, R&D Center, STATS ChipPAC KOREA, Incheon 467-701, Korea

**초 록:** 63Sn-37Pb 솔더의 실시간 electromigration 거동 관찰을 박막형 edge 이동 선형시편과 주사전자현미경을 이용하여 실시하였다. 공정조성 63Sn-37Pb 솔더의 electromigration에 의한 edge 이동 잠복기는 90~110°C에서 뚜렷하게 존재하였다. 온도에 따른 electromigration 우선확산원소는 실험온도 90~110°C에서 Pb, 25~50°C에서는 Sn으로 나타났고, 70°C에서는 Sn과 Pb가 거의 동시에 이동하여 우선확산원소가 관찰되지 않았다. 90~110°C에서 관찰된 SnPb의 electromigration에 의한 edge 이동 잠복기는 Pb 우선이동에 의해 발생되었다. 이러한 edge 이동 잠복기의 존재는 플립칩(flip chip) 솔더버프의 수명과 밀접한 관계를 가지는 것으로 보인다. Electromigration에 의해 발생하는 SnPb 솔더의 우선확산원소의 온도 의존성은 Pb와 Sn의 확산계수와 함께  $Z^*$  (전기장내의 유효전하 수)도 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다.

**Abstract :** *In-situ* observation of electromigration in thin film pattern of 63Sn-37Pb solder was performed using a scanning electron microscope system. The 63Sn-37Pb solder had the incubation stage of electromigration for edge movement when the current density of  $6.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  was applied the temperature between 90°C and 110°C. The major diffusion elements due to electromigration were Pb and Sn at temperatures of 90-110°C and 25-50°C, respectively, while no major diffusion of any element due to electromigration was detected when the test temperature was 70°C. The reason was that both the elements of Sn and Pb were migrated simultaneously under such a stress condition. The existence of the incubation stage was observed due to Pb migration before Sn migration at 90-110°C. Electromigration behavior of 63Sn-37Pb solder had an incubation time in common for edge drift and void nucleation, which seemed to be related the lifetime of flip chip solder bump. Diffusivity with  $Z^*$  (effective charges number) of Pb and Sn were strongly affect the electromigration-induced major diffusion element in SnPb solder by temperature, respectively.

**Keywords:** *in-situ*, electromigration, flip chip, incubation stage, major diffusion element, reliability

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

## 1. 서 론

오늘날 개인용 휴대용 전자기기 및 첨단 전자제품은 경량화, 소형화로 발전하고 있다. 이러한 전자제품의 발전은 반도체 소자의 집적화와 고성능화 구현에 의해 가능해졌으며, 또한 패키징 기술의 발전을 함께 요구하고 있다. 플립칩 패키징(flip chip packaging)은 반도체 소자의 접촉 패드와 패키지 기판을 솔더범프를 이용하여 직접 연결하는 접합기술로 집적회로의 고집적화, 소형화, 고기능화와 더불어 발전하고 있다. 칩의 고기능화, 소형화는 반도체 소자의 전력 소모량의 증가와 솔더범프의 직경 및 배열 간격의 감소를 통해 가능해졌다. 그러나 솔더범프의 직경 및 배열 간격의 감소와 칩의 높아진 전력 소모량은 반도체 배선에서 고밀도의 전류에 의해 발생하는 electromigration에 의한 전기적 신뢰성 문제를 플립칩 솔더범프에서도 발생시키고 있다<sup>1,2)</sup>.

Electromigration 현상은 반도체 소자에서 고전류밀도와 높은 작동온도에 의해 나타나는 원자이동 현상으로 발생하는 배선의 파괴기구로, 반도체 소자의 단선 및 단락을 유발하여 전자부품의 수명과 신뢰성에 영향을 준다<sup>3,4,5)</sup>. 현재 플립칩 패키징에 사용되는 솔더범프의 직경은 125  $\mu\text{m}$ 로 칩에 연결할 수 있는 범프의 개수는 2000여 개이지만 가까운 미래에는 수천 개 이상의 범프를 연결할 수 있게 될 것으로 예상하고 있다. 또한 집적회로 칩의 전류밀도는  $1 \times 10^4 \text{A/cm}^2$  이상으로 증가될 것으로 전망하고 있다. 집적회로 칩의 동작전류의 상승은 칩의 작동온도와 칩과 솔더 접합부의 전류밀도 상승효과를 가져오며, 낮은 용융점을 갖는 솔더범프에 electromigration 현상을 가속화시켜 전자부품의 전기적 신뢰성에 중요한 문제로 작용될 것으로 전망하고 있다<sup>6)</sup>.

공정조성 63Sn-37Pb 솔더는 플립칩 패키징의 주재료로 쓰이고 있으며, 183°C의 용융점을 갖는다. 따라서 소자에 인가되는 고전류밀도 및 높은 작동온도에 의해 발생하는 electromigration에 의한 솔더범프의 파괴에 취약하다. Electromigration에 의한 플립칩 솔더 범프의 파괴는 보이드(void)의 생성에 의해서 발생하며, 보이드의 생성은 일정 기간의 잠복기를 거친 후 발생하는 것으로 보고되었다<sup>7)</sup>. 또한 SnPb 솔더는 2상으로 존재함에 따라

electromigration 현상 발생시 온도에 따른 우선확산원소가 나타난다고 보고되고 있다<sup>2,8,9,10)</sup>. 기 고에서는 100~140°C에서 electromigration에 의해 발생하는 우선확산원소는 Pb<sup>8,9)</sup>, 상온에서는 Sn<sup>10)</sup>으로 밝히고 있다. 반면에 SnPb 계면의 상호확산(inter-diffusion)은 온도에 따라 확산속도의 차가 있으며, 약 80°C이하에서는 Pb, 80°C이상에서는 Sn이 확산속도가 빠른 것으로 보고되었다<sup>11)</sup>. 그러나 기존 연구<sup>2,8,9,10)</sup>에 사용된 시편은 범프구조로써 electromigration 현상뿐만 아니라 전류 집중(current crowding) 및 joule열 가열(joule heating), 범프와 금속하부층(under bump metallurgy)간에 생성된 금속간화합물(inter-metallic compound)의 성장 및 전류방향으로 이동에 의한 범프의 파괴현상이 함께 발생한다. 또한 electromigration 실험종료 후에 미세구조의 관찰 및 특성평가를 수행함으로써 electromigration에 의한 범프의 손상기구(failure mechanism)의 규명에 취약하다. 한편 박막형 edge 이동 선형시편은 범프시편에 비해 일정한 전류밀도 인가 및 joule 열 가열, 금속간화합물 효과를 예측할 수 있으며, 제작 공정이 단순하다. 또한 범프시편에 비해 짧은 시간 내에 electromigration 현상을 재현할 수 있으므로 실험기간의 단축으로 인한 경비절감이 가능하며, 음극(cathode)과 양극(anode)의 물질 이동의 분석이 용이한 장점이 있다.

본 연구에서는 기존 연구에서 나타난 위와 같은 취약점을 보완하여 공정조성 63Sn-37Pb 솔더의 electromigration에 의해 edge가 이동할 때 발생하는 잠복기와 온도에 따른 우선확산원소를 실시간 관찰기법과 박막형 edge 이동 선형시편을 사용하여 수행하였다. 주사전자현미경을 이용한 실시간 분석을 통해 온도에 따른 Sn과 Pb의 electromigration 거동을 관찰하였고, Energy Dispersive X-ray Spectrometer(EDS) 및 electromigration의 발생에 필요한 활성화에너지(activation energy)를 계산을 통해 온도에 따른 우선확산원소 거동을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

63Sn-37Pb 솔더의 실시간 electromigration 거동을 관찰하기 위해 Fig. 1(a)의 실시간 관찰이 용이한 다층 박막형 edge 이동 선형시편을 제작하였다<sup>12)</sup>.

우선 P형 <100> Si 웨이퍼 위에 Cu를 3000 증착 후, 표준 반도체 사진공정(lithography)과 질산을 이용한 습식 식각공정을 통하여 길이 1000  $\mu\text{m}$ , 폭 100  $\mu\text{m}$ 의 Cu 패턴을 제작하였다. 제작된 Cu 패턴은 electromigration 실험 동안 발생하는 라인과 패드간의 원자공급 효과를 없애기 위해서  $\text{SiO}_2$  절연층을 화학기상증착(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)으로 1  $\mu\text{m}$  증착 후, 라인과 패드를 분리하였다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)에 표시한 점선 "A"를 따라 절단한 시편의 단면도이다. 63Sn-37Pb 솔더 페이스트는 제작된 Cu 패턴의 라인과 패드에 도포하였으며, 190°C로 2초간 리플로우 실시 후 정확한 전류밀도 인가를 위해 4  $\mu\text{m}$  높이로 연마하였다. 제작된 선형시편은 실시간 분석용 가열장치에 부착되었으며, 주사전자현미경에 탑재시켜 100°C에서 4시간이상 열처리하였다. 열처리된 시편의 Cu하부층은 SnPb의 Sn과 반응하여  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  금속간화합물을 생성하였다<sup>13)</sup>.

SnPb 솔더의 비저항(resistivity) 값은 14.99 $\mu\Omega\text{cm}$  이고,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 의 비저항 값은 17.5 $\mu\Omega\text{cm}$ 이다<sup>14)</sup>. 각 물질의 비저항 값과 측정된 시편의 두께를 이용하면, 솔더 라인에 흐르는 유효 전류밀도를 계산할

수 있다. 따라서 인가되는 전류밀도는 63Sn-37Pb 층과  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 층의 병렬연결로 계산하였다.

63Sn-37Pb 솔더의 electromigration 실험은 전류 밀도  $3\sim 8 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ , 온도 25, 50, 70, 90, 100, 110 °C로 실시하였으며, 시편의 음극과 양극을 매시간마다 실시간 주사전자현미경으로 촬영하였다. 또한 edge 이동이 없는 시간 동안 SnPb의 조성을 EDS로 분석하고, 실시간 촬영한 Secondary Electron(SE)이미지와 EDS 분석을 통해 온도에 따른 electromigration 우선확산원소를 분석하였다. 또한 전류인가 후 음극의 edge 이동이 일어나지 않은 시간을 이용하여 electromigration에 필요한 활성화에너지를 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Electromigration 잠복기와 활성화에너지

Fig. 2는 전류밀도  $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ , 온도 100°C와 전류밀도  $3 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ , 온도 110°C에서 electromigration 실험을 30시간 동안 실시하면서 음극에서 일어난 edge 이동거리를 실시간으로 측정하여 시간에 따라 나타낸 것이다. 두 실험조건에서 63Sn-37Pb의 electromigration에 의한 물질 이동은 초기에 edge 이동이 없는 잠복기가 존재하였다. 또한 잠복기를 지난 후부터 edge 이동이 시간에 비례하여 발생하였다. Table 1은 63Sn-37Pb 솔더의 electromigration 특성분석을 위해 실시한 실험조건 및 실시

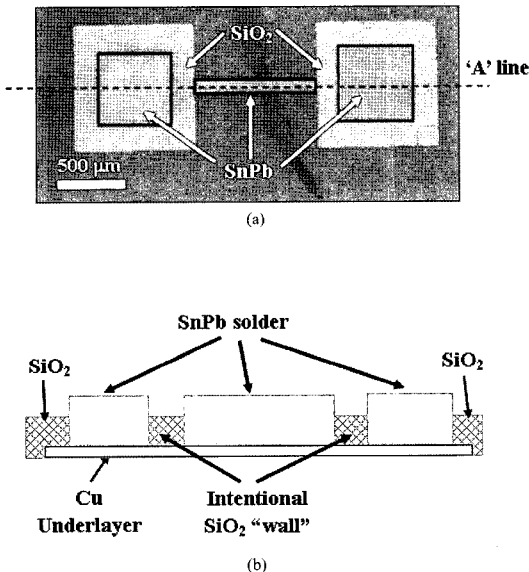


Fig. 1. Structures of 63Sn-37Pb trench-type sample for the *in-situ* electromigration test. (a) Top view SEM image (b) Schematic cross-section view across the 'A' line in (a)

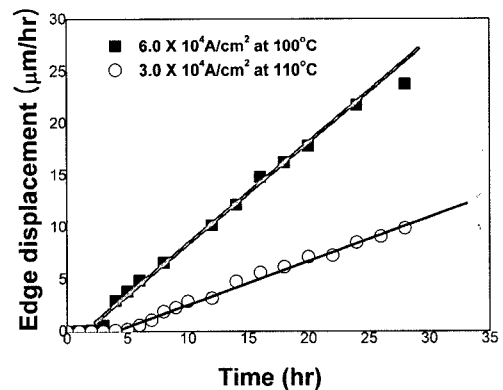


Fig. 2. Edge displacement with test time at 100°C under current density of  $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$  and at 110°C under current density of  $3 \times 10^4 \text{A/cm}^2$  for 30 hours.

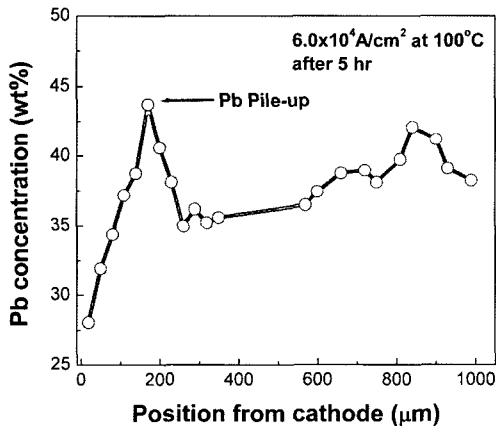
**Table 1.** Various test condition, Dominant diffusion element and incubation time

Current density (A/cm <sup>2</sup> )	Temperature (°C)	Dominant diffusion element	Incubation Time (hr)
8×10 <sup>4</sup>	25	Sn	N.A.
8×10 <sup>4</sup>	50	Sn	N.A.
8×10 <sup>4</sup>	70	Sn, Pb	N.A.
6×10 <sup>4</sup>	90	Pb	5.1
6×10 <sup>4</sup>	100	Pb	3.5
6×10 <sup>4</sup>	110	Pb	1.2
3×10 <sup>4</sup>	110	Pb	5

간 주사전자현미경으로 관찰된 우선확산원소, edge 이동이 일어나지 않은 잠복기(incubation time)을 요약하여 나타내었다.

Fig. 3은 전류밀도 6×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>, 온도 100°C에서 edge 이동이 관찰되지 않은 잠복기에서 솔더 선형 시편을 EDS분석하여 Pb 농도를 나타낸 것이다. 분석한 EDS 결과에서 알 수 있듯이 Pb농도가 음극에서 200 μm 떨어진 지점에서 높게 나타났다. 음극 끝에서의 Pb의 부족 현상은 잠복기 동안 Pb의 우선확산으로 발생한 것으로 생각된다.

Fig. 4는 전류밀도 6×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>, 100°C에서 실험 초기부터 8시간 동안 실시간으로 음극을 촬영한 SE이다. Fig. 4(b)~(e)는 Fig. 4(a)의 검은색 점선을



**Fig. 3.** EDS analysis of 63Sn-37Pb edge drift solder sample at 100°C under current density of 6×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>.

초점으로 확대하여 분석하였다. Fig. 4(b)는 전류를 인가하지 않은 상태이며, 검은색 점선은 Pb상, 흰색 실선은 Sn상이다. Fig. 4(c)에서 전류인가 후 3시간 동안 음극에서 edge 이동은 관찰되지 않으며, Pb상이 줄어드는 것이 관찰되었다. Electromigration 실험이 진행되면서 음극은 Fig. 4(d), (e)과 같이 Pb상이 완전히 빠져나간 후, Sn상이 빠져나가는 시점에서 edge 이동이 시작되었다. Fig. 4(e)에서와 같이 전류인가 8시간 후에는 Pb상은 완전히 빠져나가고 Sn상은 면적이 줄어서 남았다.

Fig. 5는 Table 1의 실험조건 6×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>, 90~110°C에서 edge 이동이 일어나지 않은 시간을 이용하여 63Sn-37Pb의 electromigration에 필요한 활성화에너지를 계산한 것이다.

선형시편에서 edge 이동이 일어나지 않은 시간은 플립칩 솔더범프에서 electromigration에 의해 발생하는 보이드의 생성에 의한 범프파괴에 이르는 시간과 거동이 유사하다<sup>7,15,16</sup>. 따라서 edge 이동을 본 연구에 사용된 선형시편의 파괴가 일어나는 시점으로 볼 때, edge 이동 전의 잠복기는 시편의 수명이라고 가정하여 Black equation을 사용한 면 식(1)로 나타낼 수 있다<sup>16</sup>.

잠복기(incubation time)

$$= TTF = Aj^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

잠복기는 박막형 edge 이동 선형시편에서 edge 이동이 일어나기 전 동안의 시간이며, 선형시편의 파괴시간(TTF(Time-To-Failure))과 같다. 전류밀도 6×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>, 90~110°C에 edge 이동 전 잠복기는 Table 1에 나타나있다. A는 시편의 단면적, j은 전류밀도, k는 Boltzmann 상수, T는 실험온도, E<sub>a</sub>는 edge 이동에 필요한 활성화에너지이다. 식(1)의 양변에 대수를 취하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ln(\text{incubation time}) = \frac{E_a}{kT} + C \quad (2)$$

식(2)을 이용하여 계산한 edge 이동이 없는 잠복기의 활성화에너지 값은 0.85eV으로 측정되었다. Fig. 5에 나타낸 잠복기의 활성화 에너지 값 0.85 eV은 Brandenburg<sup>17)</sup>와 Nakagawa<sup>18)</sup>의 Pb 이동에

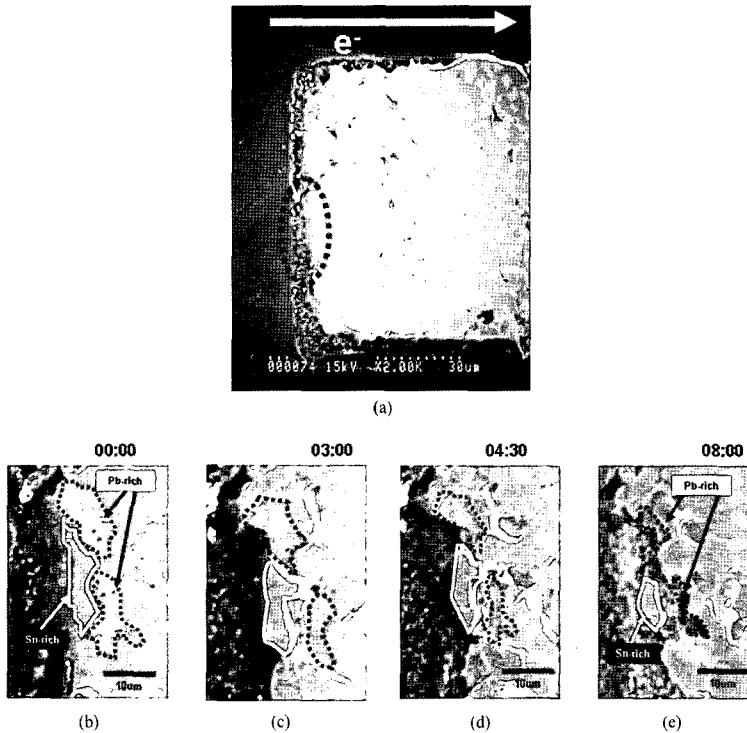


Fig. 4. *In-situ* SEM image of (a) cathode edge at 100°C under current density of  $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  after (b) 0, (c) 3, (d) 4.5, and (e) 8 hours, where bright regions are Pb-rich phases and dark regions are Sn-rich phase.

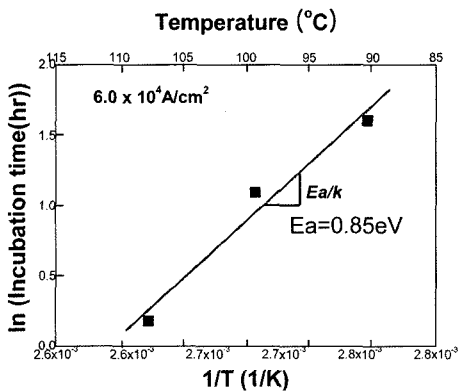


Fig. 5. Calculation of activation energy for electromigration of 63Sn-37Pb solder from incubation time as a function of temperature at current density of  $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ .

의한 범프파괴시간으로 얻은 활성화에너지 값 0.8 eV, 0.9eV와 유사하다. 따라서 잠복기는 Pb의 확산 구간임을 위의 조성분석 결과와 동일하게 확인할

수 있다. 실험을 통해 공정조성 SnPb 솔더의 electromigration에 거동을 정리하면 다음과 같다.

Electromigration에 의한 edge 이동 전 잠복기는 전류밀도  $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ , 90~110°C에서는 Pb 우선 확산에 의해 발생하며, edge 이동은 Pb 확산이 완료된 후 Sn의 이동에 의해 발생된다. 또한 선형시편의 electromigration 거동에서 나타난 잠복기 후 edge 이동은 실제 플립칩 솔더범프가 electromigration에 의한 보이드의 생성에 필요한 잠복기를 거친 후 보이드의 성장에 의해 범프가 파괴에 이르는 것과 유사하였다.

Electromigration에 의한 SnPb의 edge 이동에서 전자에 의해 운동량을 얻는 것은 Sn과 Pb 모두 일 것이다. 그렇지만 실험조건 90~110°C에서는 edge 이동이 일어나지 않은 잠복기 동안은 Pb의 확산이 우선하였으며, edge 이동은 Pb의 확산이 완료된 후 Sn 이동으로 일어났다. 이것은 선형시편에서 Sn과 Pb의 electromigration에 의한 주 이동 경로가 결정립계로, Pb 우선 확산에 의해 이동 경로가 먼

저 잠식당하여 잠복기 동안은 Sn이 이동하지 못한 것으로 생각된다.

### 3.2 63Sn-37Pb의 온도에 따른 electromigration 우선 확산원소

Fig. 6은 전류밀도  $8 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ , 온도  $50^\circ\text{C}$ 에서 30시간 동안 실시한 63Sn-37Pb 솔더의 실시간 electromigration 거동을 촬영한 SE사진이다. Fig. 6(a)의 흰색 실선 원을 초점으로 확대 분석하였다. Fig. 6(b)는 전류를 가하기 전의 초기 시편의 음극 사진이며, 흰색 실선은 Sn-rich 상, 검은색 실선은 Pb-rich 상을 표시하였다. 전류를 가하여 Fig. 6(c)~(e)로 진행되는 동안 음극의 edge에서는 Sn상의 확산이 관찰되었다. Pb상은 Fig. 6(e)처럼 Sn상이 대부분 빠져나간 후에도 변화가 없었다.

Fig. 7은 전류밀도  $8 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ ,  $70^\circ\text{C}$  조건으로 9시간 실시한 63Sn-37Pb 솔더의 실시간 electro-

migration 거동을 촬영한 Backscattered Electron (BSE) 사진이다. Fig. 7(b)~(e)는 Fig. 7(a)의 검은색 점선을 초점으로 분석하였다. Fig. 7(b)은 전류를 인가하지 않은 상태이며, 검은색 점선은 Pb상, 검은색 실선은 Sn상이다. Fig. 7(c)전류인가 5시간 동안 음극의 edge 이동은 없으며, Pb상과 Sn상이 함께 줄어들어 가는 것이 관찰되었다. Electromigration 실험이 진행되면서 음극은 Fig. 7(d)~(e)과 같이 Pb상과 Sn상이 동시에 빠져나가며, edge 이동은 시작되었다. Fig. 7(e) 전류인가 후 9시간에는 시편의 Pb, Sn이 함께 빠져나가는 것을 알 수 있다. Fig. 4 전류밀도  $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ ,  $100^\circ\text{C}$  조건에서의 electromigration 우선 확산원소는 Pb이며, Fig. 6 전류밀도  $8 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ ,  $50^\circ\text{C}$  조건에서의 electromigration 우선 확산원소는 Sn으로 나타났다.

본 실험결과에서 나타난 electromigration 우선 확산원소는 선행연구에서 보고한  $25^\circ\text{C}$ 에서는 Sn,

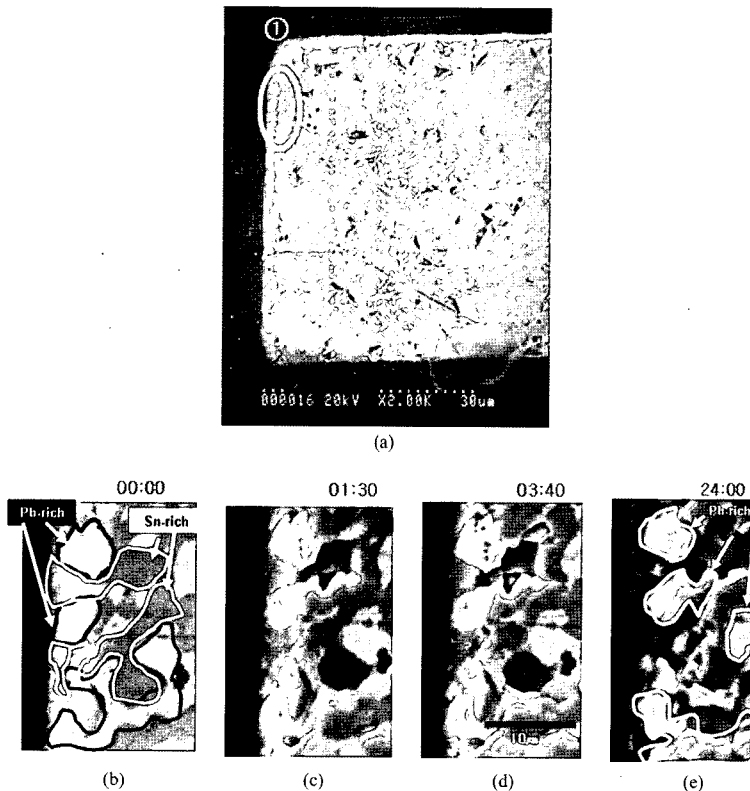
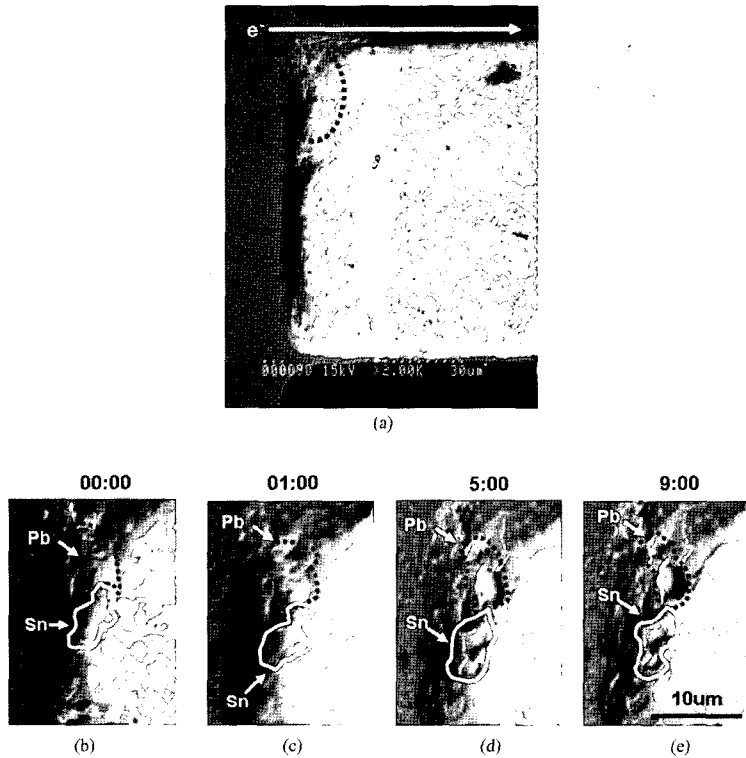


Fig. 6. *In-situ* SEM image (a) cathode edge at  $50^\circ\text{C}$  under current density of  $8 \times 10^4 \text{A/cm}^2$  after (b) 0, (c) 1.5 (d) 3.5 and (e) 24 hours, where bright regions Pb-rich phase and dark regions are Sn-rich phases.



**Fig. 7.** *In-situ* SEM image of (a) cathode edge at 70°C under current density of  $8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  after (b) 0, (c) 1, (d) 5, (e) 9 hours, where bright points are Pb-rich phase and dark regions are Sn-rich phases.

100-140°C에서는 Pb의 확산 결과와 일치한다<sup>2,8,9)</sup>. 그러나 70°C에서는 SnPb의 동시이동으로 우세 확산원소가 관찰되지 않았다. 또한 본 연구의 온도에 따른 electromigration 우선확산원소는 Gupta<sup>11)</sup>의 공정조성 SnPb 솔더합금의 계면에서 발생한 상호확산에서의 온도에 따른 Sn과 Pb의 확산속도와는 반대의 결과를 나타낸다. Gupta<sup>11)</sup>는 SnPb 계면간 상호확산은 약 80°C 부근에서 Sn, Pb간의 확산속도의 역전이 일어나며, 80°C이상에서의 우선확산원소는 Sn, 80°C이하에서의 우선확산원소는 Pb로 보고하였다<sup>11)</sup>. 따라서 70°C는 Pb, Sn의 계면에서 상호확산의 확산속도가 역전되는 온도 부근임으로 우선원소가 명확하게 나타나지 않은 것으로 생각된다.

Electromigration 우선확산원소가 SnPb의 상호확산에 의한 결과와 다르게 나타나는 것은 확산과 달리 electromigration 현상은 electron wind force에 의해 원자가 이동하는 것으로 이동기구의 차이에서 비롯된다고 생각된다. Electromigration에 의해

발생되는 원자유속  $J_{EM}$ 은 전자에 의해 움직이는 원자의 이동속도와 원자농도의 곱( $J = vC$ )으로 나타낼 수 있다<sup>19)</sup>.

$$J_{EM} = \left( \frac{CD}{kT} \right) Z^* e \rho j \quad (3)$$

$C$ 는 원자의 농도이고,  $D$  확산계수,  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $Z^*$ 는 전기장 내의 유효 전하수이며, 이것은 전기장 속에서의 원자의 이동방향과 전자로부터 원자로의 유효 운동량 전달에 대한 정보를 제공한다.  $e$ 는 전자의 기본 전하량,  $\rho$ 는 물질의 비저항, 그리고  $j$ 는 전류밀도이다. 원자의 유속을 농도로 나누어 이동속도로 나타내면( $v = J/C$ ), 다음 식(4), (5)와 같다.

$$v = \frac{D}{kT} Z^* e \rho j \quad (4)$$

$$DZ^* = \frac{vkT}{e\rho j} \quad (5)$$

$v$ 는 edge 이동 속도이며, 이것은 실제 선형시편의 음극에서 일어나는 시간에 따른 edge 이동 속도로 얻어진다. 나머지  $T, e, \rho, j$ 는 상수이므로 실제 edge 이동속도  $v$ 를 구하면  $DZ^*$ 을 식 (5)와 같이 계산할 수 있다. Table 2는 전류밀도  $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ , 90~110에서 계산한  $D \times Z^*$ 을 나타낸 것이다. 전류밀도  $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ , 25~70°C구간에서는 80시간 동안 실험을 하였으나, edge 이동이 느리게 발생함으로써, 이동 속도를 획득하지 못하여서  $D \times Z^*$ 을 계산하지 않았다.

앞에서 구한 전류밀도  $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ , 90~110°C에서 얻은 edge 이동 속도는 Sn, Pb 각각의 속도가 아닌 SnPb가 동시에 이동한 속도이다. 선형시편의 electromigration에 의한 edge 이동이 없는 잠복기 동안은 Pb가 확산하였지만, 잠복기를 지난 후에 발생하는 edge 이동은 Sn, Pb가 양극(anode) 방향으로 함께 이동에 의해 일어난다. 그러므로 Sn, Pb 각각의 edge 속도 및 온도에 따른 확산속도를 계산하는 것은 어렵다. Electromigration에 의한 원자 이동시 우선확산원소의 결정에 영향을 주는 인자는 원자의 확산속도  $D$ , 농도  $C$ , 유효전하  $Z^*$ 이다. 그 중  $Z^*$ 는 전기장내 유효전하수로 electron wind force에 의한 원자 이동에 실질적으로 운동량을 부여하는 것으로 알려져 있다<sup>18)</sup>.  $Z^*$ 에 대한 논의로 Lee<sup>2)</sup>는 120~140°C에서  $Z^*$ 가 Sn보다 Pb가 크다고 보고하였다. 그러나 Lee<sup>2)</sup>이 계산한 Pb, Sn의  $Z^*$ 는 Gupta<sup>11)</sup>가 보고한 63Sn-37Pb 솔더 합금의 계면에서 상호확산이 일어날 때 Pb, Sn 각 원자가 가지는 온도에 따른 확산속도를 가지고 구하였으므로 검증된 값이 아니다. 단 SnPb의 상호확산에서 확산속도가 90~110°C에서 Sn이 크게 나타나지만, electromigration에 의한 우선확산원소와는 반대의 결과를 나타내므로, electromigration에 의한 우선확산원소의 결정에는 Pb, Sn의 확산속도와 함께  $Z^*$ 가 주요 인자로 작용하는 것으로 생각된다.

Table 2. Comparison of  $D \times Z^*$  and drift velocity as a function of temperature at  $6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$

Temperature (°C)	110	100	90
$V_{\text{Drift velocity}}$	1.116 $\mu\text{m/hr}$	0.925 $\mu\text{m/hr}$	0.513 $\mu\text{m/hr}$
$D \times Z^*_{\text{SnPb}}$	$1.137 \times 10^{-3}$	$9.18 \times 10^{-4}$	$4.95 \times 10^{-4}$

## 4. 결 론

본 연구에서는 선형구조의 63Sn-37Pb 솔더시편을 이용하여 실시간 electromigration 거동의 분석 및 온도에 따른 우선확산원소를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 90~110°C 구간에서는 63Sn-37Pb 솔더의 electromigration에 의한 edge 이동 잠복기가 존재하였고, 잠복기간 동안은 Pb의 우선확산 거동이 관찰되었다.
2. 63Sn-37Pb 솔더의 electromigration 거동은 선형시편 및 플립칩 솔더범프가 각각 edge 이동 잠복기 및 보이드 생성 잠복기를 공통적으로 가지며, 이러한 잠복기는 플립칩 솔더범프의 electromigration 수명과 밀접한 관계를 가지고 있었다.
3. 63Sn-37Pb 솔더의 electromigration에 의해 발생하는 우선확산원소는 전류밀도보다는 온도 의존 경향이 나타났고, 90~110°C에서는 Pb, 25~50°C에서는 Sn가 우선확산원소로 나타났다. 한편 70°C에서는 Sn과 Pb가 함께 이동하는 것이 관찰되었다.
4. 63Sn-37Pb 솔더의 우선확산원소가 온도에 따라 바뀌는 거동은 Pb와 Sn의 확산계수뿐만 아니라,  $Z^*$ 도 주요 인자로 기여하는 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 전자부품신뢰성 설계 기술사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. International technology Roadmap for semiconductors 1999 Edition, Semiconductor industry Association (2000)
2. 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)
3. Y. C. Hsu, T. L. Shao and C. Chen, "Electromigration induced failure in SnAg<sub>3.8</sub>Cu<sub>0.7</sub> Solder Joints for Flip Chip Technology." IEEE Symposium on electronic materials and packaging (2002)



4. K. N. Tu, J. W. Mayer and L. C. Feldman, "Electronic Thin Film Science", Macmillan Publishing Company, New-York(1992) J. R. Lloyd: J. Phys. (1999)
5. R. S. Muller and R. T. Howe, eds., *Microsensors*, IEEE Press, New York: (1991)
6. K. N. Tu, "Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects", J. Appl. Phys., Vol. 94, No. 9, 5451 (2003)
7. Y. H. Lin, T. 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., Vo. 53, 2029 (2005)
8. Glenn A. Rinne, "Issues in accelerated electromigration of solder bumps", Microelectronics Reliability, Vol. 43, 1975 (2003)
9. J. Y. Choi, S. S. Lee and Y. C. Joo, "Electromigration behavior of eutectic SnPb solder", Jpn. J. Appl. Phys., Vo. 41, 7487 (2002)
10. C. Y. Liu, C. Chen, C. N. Liao and K. N. Tu, "Microstructure-electromigration correlation in a thin stripe of eutectic SnPb solder stressed by Cu electrodes", J. Appl. Phys., Vol. 75, No. 1, 58 (1999)
11. D. Gupta, K. Vieregge and W. Gust, "Interface Diffusion in Eutectic Pb-Sn solder", Acta Mater., Vol. 47, No.1, 5 (1999)
12. O. H. Kim, S. M. Yoon, Y. C. Joo and Y. B. Park, "In-situ Observation of Electromigration Behaviors of Eutectic SnPb Line", J. Microelectronics & Packaging Soc., Vol. 12, No. 4, (2005)
13. A. S. Zuruzi, C. h. Chiu, S. K. Lahiri and K. N. Tu., "Roughness evolution of Cu6Sn5 intermetallic during soldering", J. Appl. Phys., Vol. 86, No. 9, 4916 (1999)
14. H. P. R. Frederikse, R. J. Fields, and A. Feldman, "Thermal and electrical properties of copper-tin and nickel-tin intermetallics", J. Appl. Phys., Vol. 72, pp. 2879-2882 (1992)
15. 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)
16. T. Y. Lee, K. N. Tu and D. R. Frear, "Electromigration of eutectic SnPb and SnAg<sub>3.8</sub>Cu<sub>0.7</sub> flip chip solder bumps and under-bump metallization", J. Appl. Phys., Vol. 90, 4502 (2001)
17. S. Brandenburg and S. Teh, "Proceedings of the Surface Mount International Conference and Exposition", SMI 98 Proceedings, 337(1998)
18. K. Nakagawa, S. Baba, M. Watanabe, K. Harada, E. Hayashi, Q. Wu, A. Meada, M. Nakanishi and N. Ueda, "Thermo-Electromigration phenomenon of Solder Bump, Leading to Flip-Chip Devices with 5,000 Bump", 2001 Electronic Components and Technology Conference, (2001)
19. Q. T. Huynh, C. T. Liu, C. Chen and K. N. Tu, "Electromigration in eutectic SnPb solder lines", J. Appl. Phys., Vol. 89, No. 8, 4332 (2001)