

## SnAgCu 솔더 라인의 Electromigration 특성 분석

고민구 · 윤민승 · 김빛나 · 주영창\* · 김오한<sup>1</sup> · 박영배<sup>1</sup>

서울대학교 재료공학부, 안동대학교 신소재공학부<sup>1</sup>

## Electromigration Behaviors of Lead-free SnAgCu Solder Lines

Min-Gu Ko, Min-Seung Yoon, Bit-Na Kim and Young-Chang Joo\*,  
Oh-Han Kim<sup>1</sup>, and Young-Bae Park<sup>1</sup>

School of Materials Science and Engineering, college of engineering  
Seoul National University, San 56-1 Sillim-dong Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea,  
<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong  
760-749, Korea

**초 록:** 선형구조의 시편을 사용하여 Sn96.5Ag3.0Cu0.5의 electromigration 특성을 살펴보고 공정 조성의 SnPb의 electromigration 특성과 비교, 분석하였다. SnAgCu의 electromigration에 관한 특성 중 시간에 따른 물질의 이동 양상과 여러 가지 electromigration 매개변수 (활성화 에너지, 임계 전류밀도, 확산 계수와 유효전하수의 곱)을 살펴보았다. 임계 전류 밀도는 140°C에서  $2.38 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  이고 이 값은 140°C에서 electromigration에 의한 물질 이동이 발생하지 않는 최대 전류 밀도를 나타낸다. 활성화 에너지는 110-160°C 온도 범위에서 0.56 eV가 측정되었다. DZ\*의 값은 110°C에서  $3.12 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 125°C에서  $4.66 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 140°C에서  $8.76 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 160°C에서  $2.14 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  이었다. 그리고 SnAgCu와 공정 조성의 SnPb 물질의 electromigration 거동 특징은 크게 다른데, SnPb의 경우 음극에서 보이드(void) 형성이 발생하기 전에 잠복 시간이 존재하고 SnAgCu의 경우 잠복 시간이 존재하지 않는다는 점이다. 이는 각 원소들의 확산 기구(diffusion mechanism)의 차이에 기인한 것이라 생각된다.

**Abstract:** Electromigration behavior in the Sn96.5Ag3.0Cu0.5 solder lines was investigated and compared Sn96.5Ag3.0Cu0.5 with eutectic SnPb. Measurements were made for relevant parameters for electromigration of the solder, such as drift velocity, threshold current density, activation energy, as well as the product of diffusivity and effective charge number (DZ\*). The threshold current density was measured to be  $2.38 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  at 140°C and the value represented the maximum current density which the SnAgCu solder can carry without electromigration damage at the stressing temperatures. The electromigration energy was measured to 0.56 eV in the temperature range of 110~160°C. The measured products of diffusivity and the effective charge number, DZ\* were  $3.12 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$  at 110°C,  $4.66 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$  at 125°C,  $8.76 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$  at 140°C,  $2.14 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  at 160°C. SnPb solder existed incubation stage, while SnAgCu did not have incubation stage. It was thought that the diffusion mechanism of SnAgCu was different from that of SnPb.

**Keywords:** electromigration, activation energy, incubation time, threshold current density

\*Corresponding author  
E-mail: ycjoo@plaza.snu.ac.kr

## 1. 서 론

오늘날 반도체 전자 패키지 산업에서 가장 중요한 전기적 신뢰성 문제 중 한 가지가 electromigration 현상이다. Electromigration 현상이란 금속 배선이나 솔더 물질에 높은 전류 밀도를 가했을 때, 전자와 원자 간의 운동량 전달을 통해서 금속 원자가 이동하고 이로 인하여 음극에서는 보이드가 형성되고 양극에서는 힐록이 형성되는 현상을 말한다. 현재 전자 패키지 부분에서 단위 면적당 보다 많은 수의 입출력 단자의 필요와 고성능 소자의 작동을 위해 플립 칩 솔더 범프의 사용과 소형화는 필수적이다. 디자인 룰에 따르면 지금 개발 중인 50  $\mu\text{m}$  직경의 솔더 범프에 0.2A의 전류가 흐른다면 전류 밀도는  $10^4 \text{A}/\text{cm}^2$  정도의 수준까지 흐른다고 한다.<sup>1)</sup> 이 전류 밀도는 Al 이나 Cu 배선에 흐르는 전류 밀도에 비해 약 100배 정도 작지만 플립 칩 솔더에서는 electromigration 현상에 의한 배선 파괴가 발생한다.<sup>2)</sup> 그 이유는 솔더 자체의 녹는점이 Al이나 Cu에 비해 낮은 뿐만 아니라 확산 계수가 크기 때문이다.

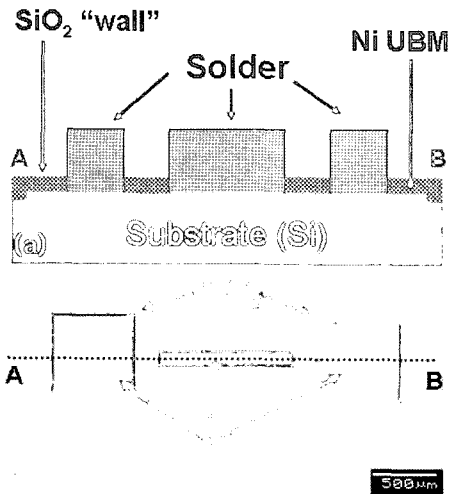
Electromigration 현상에 대한 연구는 기존 반도체 소자 내 Al 혹은 Cu 배선에서 많이 연구가 되어 왔지만 플립칩 솔더 범프에서는 electromigration 연구가 많이 미진한 상태이다. 또한 플립칩 솔더 범프의 electromigration 현상은 배선을 이루고 있는 물질의 차이로 인해 기존 Al, Cu 배선의 electromigration 현상과 상이한 모습을 보인다. Al 이나 Cu 배선은 단일 원소로 이루어져있던가 혹은 1% 내외의 아주 작은 양의 합금 원소만이 포함되지만, 플립 솔더 범프에서 사용되는 솔더 물질은 대부분 2원계 또는 3원계 이상의 물질을 포함하고 있다. 현재 가장 많이 사용되는 솔더 물질은 공정 조성의 SnPb로 Sn(63 wt%), Pb(37wt%)로 구성되어 있다. 이와 같이 솔더 물질이 합금으로 이루어져 있기 때문에 electromigration이 일어날 때의 메커니즘이 복잡할 것이라고 예상된다.

본 연구에서는 납이 제거된 Sn96.5Ag3Cu0.5 합금을 주되게 사용하였다. 현재 환경적인 이유로 인해 납 사용이 규제되고 있어서 납을 제거한 무연 솔더 물질의 연구가 한창이고, 연구중인 무연 솔더 물질중 SnAgCu 물질이 가장 추천받고 있기 때문이다. 또한 본 연구에서 플립칩 솔더 범프의

일반적인 구형태의 구조가 아닌 Blech 와 Herring<sup>3)</sup>이 제안한 선형 시편을 제작하여 실험을 수행하였다. 선형 시편은 실제 소자에서 사용되는 플립 칩 솔더 범프와는 구조가 다르지만 플립 칩 범프에서 관찰하기 힘든 미세한 변화를 쉽게 분석할 수 있고 솔더의 이동 길이를 정확하게 알 수 있는 장점이 있다. 또한 전류 밀도를 일정하게 유지할 수 있고 박막 공정을 통해서 시편을 쉽게 만들 수 있다는 장점도 있다. SnPb electromigration과 관련하여서는 많은 연구가 진행되어 있고 이와 관련된 파라미터(Ea: 활성화 에너지, Z\*: 유효 전하수, Jth: 임계 전류 밀도 등)가 보고된 상태이지만<sup>4,5)</sup>, SnAgCu는 electromigration에 관한 연구는 거의 진행되지 않은 상태이다.<sup>6)</sup> 이 실험에서는 SnAgCu의 electromigration 현상에 관련한 여러 가지 실험을 수행하여 주요 인자를 측정하였으며, SnPb에서 나타나는 현상과 비교하였다.

## 2. 실험방법

SiO<sub>2</sub>가 1000A 증착된 P-type Si(100) 4" 웨이퍼에 열 증착기를 사용하여 Ni 3000A를 증착하고 ferrichloride 용액(40°C)으로 두개의 패드(pad)와 라인(line)이 연결된 구조로 식각(etching)한 후, PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 SiO<sub>2</sub> 1  $\mu\text{m}$  증착했다. 그리고 라인과 패드 위의 SiO<sub>2</sub>를 건식 식각하였다. 그러나 라인과 패드 사이를 분리하기 위하여 그 사이에 있는 SiO<sub>2</sub>는 식각하지 않았는데, 이는 SiO<sub>2</sub> 자체가 벽이 되어 electromigration 실험을 할 때, 패드가 라인에 미치는 영향을 막을 수 있다. 라인의 폭과 길이는 각각 100  $\mu\text{m}$ , 1000  $\mu\text{m}$ 이다. 작은 양의 SnAgCu 솔더 페이스트를 SiO<sub>2</sub> 식각에 의해 드러난 Ni 라인과 패드 위에 바른 후에 가열판에서 220°C에서 5초간 리플로우하였다. 그 후, 솔더 라인의 두께가 3-5  $\mu\text{m}$ 가 될 때까지 연마 하였다. 그림 1(a), (b)는 SnAgCu 선형 시편을 윗면에서 SEM (Secondary Electron Microscope)으로 찍은 사진과 측면 개략도를 보여주고 있다. Electromigration 실험은 110, 125, 140 그리고 160°C의 온도에서 수행하였다. 모든 시편은 실험 전에 Ni과 솔더 사이에 금속간 화합물 형성과 미세 구조를 안정화하기 위하여 각각의 실험 온도에서 2시간 동안 열처리 하



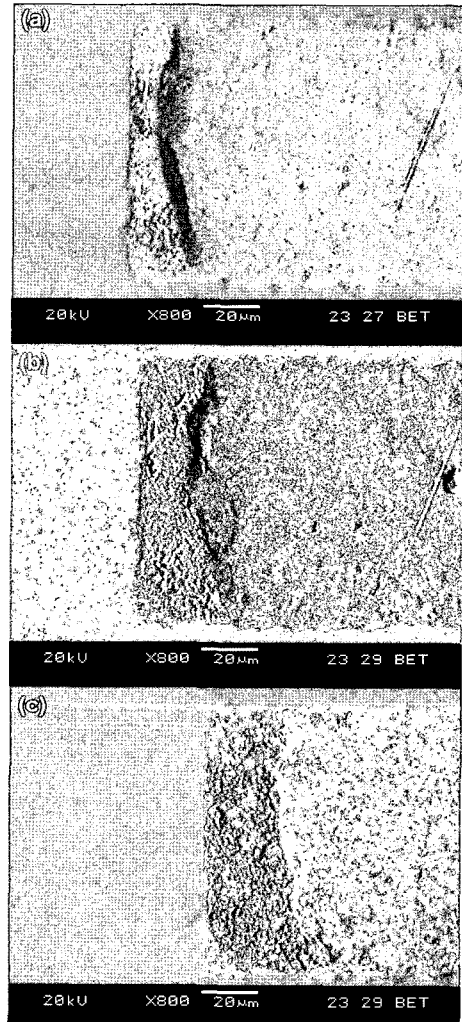
**Fig. 1.** The image of solder edge drift specimen (a) Cross-sectional diagram of the solder strip (b) Plain-view diagram of the solder specimen.

였다. 220°C에서 SnAgCu 솔더를 Reflow하면 0.3 µm Ni이 완전히 금속간 화합물인  $(NixCuy)_3Sn_4$ 로 변한다.<sup>7)</sup> Ni이 금속간 화합물로 변하기 때문에 전류가 SnAgCu 라인뿐만 아니라  $(NixCuy)_3Sn_4$  에도 흐르게 되어 선형 시편은 병렬 회로 구조가 된다. SnAgCu의 비저항은  $12.31 \mu\Omega\text{cm}$ 이고  $(NixCuy)_3Sn_4$ 의 저항은  $28.5 \mu\Omega\text{cm}$ <sup>8)</sup>이다. 각 물질의 비저항 값과 측정된 각 층의 두께를 이용하면, 솔더 라인에 흐르는 유효 전류밀도를 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 계산하여 SnAgCu 솔더 라인에 인가한 전류밀도는  $3.0 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ ,  $4.5 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ ,  $6.0 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 이었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 SnAgCu 솔더의 electromigration

그림 2는 SnAgCu 솔더 라인을 160°C,  $4.5 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 에서 30hr 동안 실험한 시편으로서 SEM의 BSE (Back Scattered Electron) 방법으로 측정된 사진이다. 시간이 지남에 따라 음극쪽에서 솔더 물질이 양극방향으로 이동하여 보이드가 형성됨을 확인하였다. 시간에 따라 형성된 보이드 크기를 image analyzer를 이용하여 측정한 결과, 각각 10시간, 20시간, 30시간에 13.87 µm, 23.14 µm, 33.67 µm만큼 이동함을 알 수 있었다.  $4.5 \times 10^4 \text{A/}$



**Fig. 2.** SEM images of SnAgCu line near the cathode end in BSE mode at (a) 10 hr, (b) 20 hr, (c) 30 hr of the electromigration under a current density of  $4.5 \times 10^4 \text{A/cm}^2$  at 160°C.

$\text{cm}^2$ 의 전류 밀도를 인가하고 온도를 변화시켰을 때 (110°C, 125°C, 140°C, 160°C) 시간에 따른 음극에서 물질이 이동된 거리를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 각 온도에서 물질의 이동거리가 시간에 따라 비례함을 확인하였다.

SnAgCu에서 electromigration의 활성화 에너지, 확산 계수와 유효 전하수의 곱, 그리고 임계 전류 밀도와 같은 물성값을 계산하기 위하여 electromigration의 플럭스(flux) 식을 사용하였다. Electromigration의 플럭스 식은 다음과 같이 표현된다.<sup>9)</sup>

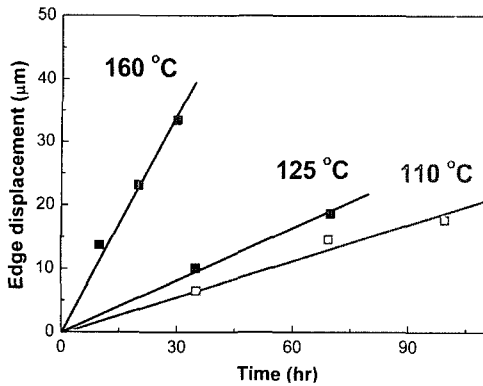


Fig. 3. Edge displacement of the SnAgCu solder line as a function of time under a current density of  $4.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ .

$$J_{EM} = Cv = C \left( \frac{D_0}{kT} \right) \exp \left( -\frac{E_a}{kT} \right) Z^* e \rho j \quad (1)$$

(C는 단위 부피당 원자의 수,  $v$ 는 물질 이동 속도  $D_0$ 는 electromigration에 의한 확산 계수,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T$ 는 절대 온도,  $E_a$ 는 활성화 에너지,  $Z^*$ 는 유효 전하수,  $e$ 는 전하량,  $\rho$ 는 비저항,  $j$ 는 전류 밀도 이다.)

(1)식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$v = \left( \frac{D_0}{kT} \right) \exp \left( -\frac{E_a}{kT} \right) Z^* e \rho j \quad (2)$$

SnAgCu의 electromigration 저항성을 알기 위해서는 물질 고유 값인 활성화 에너지를 알아야 한다. (2)식의 각 변에 자연 로그를 취해주고 식을 간단히 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln(v \times T) = -\frac{E_a}{kT} + C \quad (3)$$

(3) 식에서 기울기는 활성화 에너지를 나타내고 각 온도와 이동 속도를 나타낸 것이 그림 4이다. 그림 4에서 각각의 점들을 선형회귀하여 기울기를 구하였고 이를 통해 SnAgCu electromigration의 활성화에너지는 110-160°C구간에서 0.56 eV 나온다는 것을 계산하였다. 현재까지 SnAgCu는 electromigration 실험이 거의 진행되어 있지 않기 때문에 특별히 비교할 수 있는 활성화 에너지에 대한 기존 결과는 거의 보고된 바가 없다.

확산계수와 유효전하수의 곱인  $DZ^*$ 의 값을 각

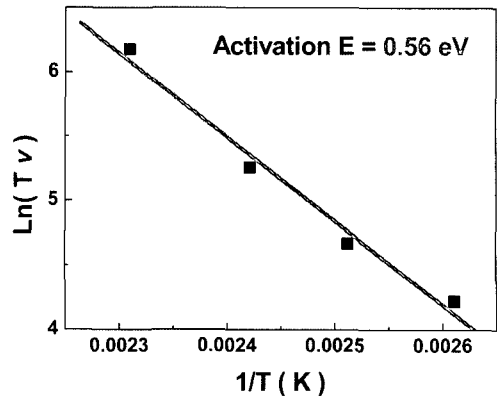


Fig. 4. Activation Energy of the SnAgCu solder line of  $4.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  at 110-160°C.

온도에서 측정해 보았다.  $DZ^*$ 의 값은 110°C에서  $3.12 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 125°C에서  $4.66 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 140°C에서  $8.76 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 160°C에서  $2.14 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ 으로 측정되었다. 결과값들을 표현한 것이 그림 5이고, 이것을 통해  $DZ^*$ 의 값은 온도에 따라 지수적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

### 3.2 SnAgCu 솔더의 electromigration 잠복 시간

SnAgCu와 공정 조성의 SnPb를 각각 140°C에서  $4.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ , 110°C에서  $3.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  조건에서 실시간 electromigration 실험을 하였다. 솔더의 보이드 이동을 실시간으로 측정하기 위해 SEM 안에 열과 전류를 인가할 수 있는 장비를 장착했다. 그림 6은 장비의 개략도를 보여주고 있다. 보통 시편이 이동한 이미지를 얻기 위해서는 electromigration 실험을 한 후 전류 인가를 중지하고 SEM 사

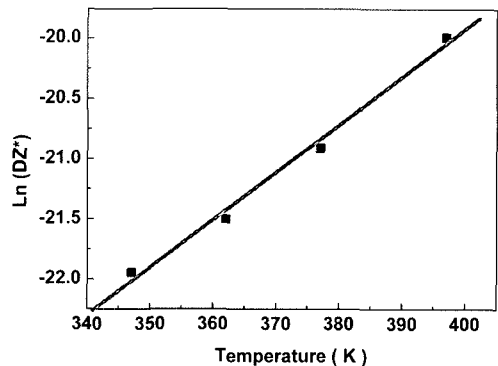


Fig. 5.  $DZ^*$  as a function of temperature.

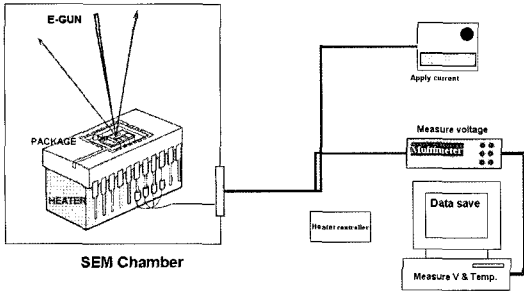


Fig. 6. schematic of in-situ SEM equipment.

진을 찍지만, 실시간 SEM은 electromigration 실험 시 전류를 인가하면서 실시간으로 SEM 사진을 얻을 수 있는 장점이 있다. 실시간 SEM으로 관찰한 시간에 따른 물질이동 거리는 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)에서 볼수 있듯이 SnAgCu는 전류를 인가한 초기부터 음극에서 물질이동이 일어난다. 그러나 그림 7(b)에 따르면 SnPb는 전류 인가한 후 5시간이 될 때까지 음극에서 물질이동이 일어나지 않고, 그후 보이드가 생성되어 성장한다. 전류를 인가한 후에도 보이드 형성이 발생하지 않는 시간을 잠복 시간이라고 한다. 공정 조성의 SnPb에서 잠복 시간이 존재하는 이유는 전류를 인가하면 Sn 보다 Pb가 먼저 이동을 하고 Pb가 이동하는 중에 Sn의 이동을 지연시키기 때문이다.

그에 반해 SnAgCu에서는 잠복 시간이 존재하지 않았다. SnAgCu 솔더 내에서 각 물질의 확산속도는 다르다. 보고된 결과에 따르면 Sn 내에서 Sn과 Ag의 확산계수를 비교해 볼 때, Ag의 확산계수가 더 크기 때문에,<sup>10)</sup> 확산의 관점에서는 Ag가 먼저 이동할 것이라고 생각된다. 확산계수가 더 큰 Ag가 먼저 이동한다면 SnPb의 결과에서처럼 보이드 형성 전 잠복 시간이 있을 것이라 예상된다. 또한 SnPb에서 잠복기가 존재한다는 그림 7(b)의 결과와 동일하게 Al(Cu) 합금에서도 electromigration 실험한 결과를 보면 우선 이동하는 Cu에 의하여 잠복시간이 존재한다는 것이 보고되었다.<sup>11)</sup> 하지만 본 연구에서는 그림 7(a)에서 관찰되듯이 SnAgCu에서는 잠복 시간이 존재하지 않는다는 것이 관찰되었다. SnAgCu에서 잠복기가 존재하지 않는 이유를 고찰하기 위해 Ag가 electromigration에 미치는 영향을 살펴 보았다. SnAgCu 솔더 내에서 리플로우를 하면 Ag<sub>3</sub>Sn 화합물이 형성되

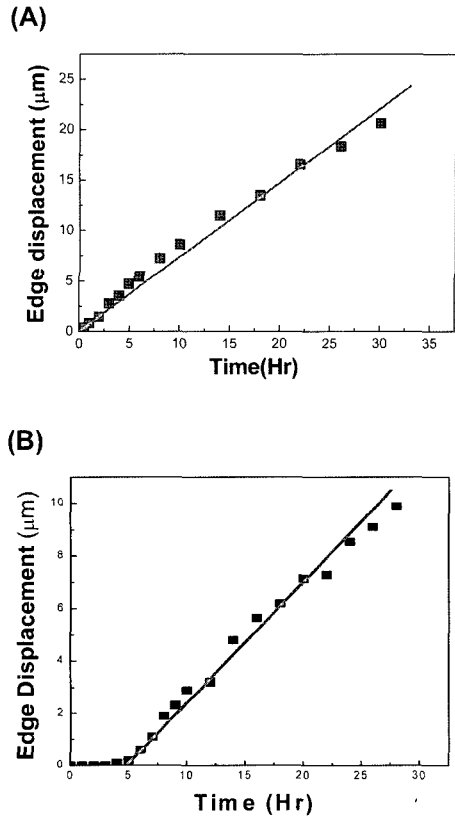


Fig. 7. Drift length of solder line as a function of time at in-situ SEM (a) SnAgCu,  $4.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  at  $140^\circ\text{C}$  (b) SnPb,  $3.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  at  $110^\circ\text{C}$ .

어진다고 보고하고 있다.<sup>12)</sup> 그림 8은  $140^\circ\text{C}$ 에서  $4.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 전류밀도, 100시간동안 실험한 시편을 습식 식각해서 SEM으로 본 결과이다. 그림 8(a)에서 밝게 표시된 부분을 확대하여 EDX mapping을 통해 조성을 분석한 결과 Ag<sub>3</sub>Sn 화합물이 형성됨을 확인할수 있었다. 이 사실을 통해서 SnAgCu 솔더 라인에서는 electromigration에 의해 Ag가 이동을 하기 전에 Ag<sub>3</sub>Sn 화합물을 형성하여 고착되고 Ag는 SnAgCu electromigration에 거의 기여를 하지 않는다는 것을 알수 있었다. Ag는 고착되어 SnAgCu는 거의 순수한 Sn처럼 electromigration 거동을 보이기 때문에 잠복 시간이 나타나지 않는다고 생각된다. 이같은 이유로 SnPb는 잠복 시간이 있고 SnAgCu는 잠복 시간이 없다고 생각할 수 있다.

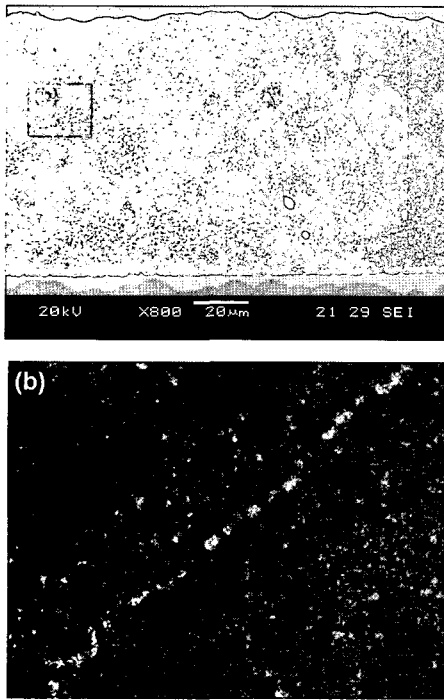


Fig. 8. SEM image of SnAgCu solder line of  $4.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  at  $140^\circ\text{C}$  after 100 hours (a) SEM image of Solder line (b) EDS Mapping (Ag) of red line square in figure 7(a).

### 3.3 SnAgCu 솔더의 임계 전류 밀도

SnAgCu electromigration 특성중에 하나인 임계 전류밀도를 측정하였다. 임계 전류밀도는 electromigration에 의해 보이드가 형성되지 않는 최대 전류밀도를 의미한다. SnAgCu의 임계 전류 밀도를 측정하기 위해서 같은 온도에서 다른 전류밀도로 실험을 수행해야 하고 그림 9는  $140^\circ\text{C}$ 에서  $3.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  -  $6.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  범위에서 전류를 인가함에 따른 솔더의 이동 속도에 대한 결과를 보여주고 있다. 전류밀도에 따른 보이드 이동 속도를 선형 회귀하고 외삽하여 이동 속도가 0이 되는 전류 밀도를 찾았고, 이 전류밀도가 바로 임계 전류 밀도를 의미한다. 그 결과  $2.38 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  이하에서는 electromigration에 의한 솔더의 물질 이동이 발생하지 않음을 알 수 있었다. Chih Chen et al.에 의하면  $100^\circ\text{C}$ 에서 SnPb를 가지고 실험을 수행할 경우, 임계 전류밀도가  $8.5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$  임을 보고하고 있고 본 연구와 유사한 값이 보고되었다.<sup>13)</sup>

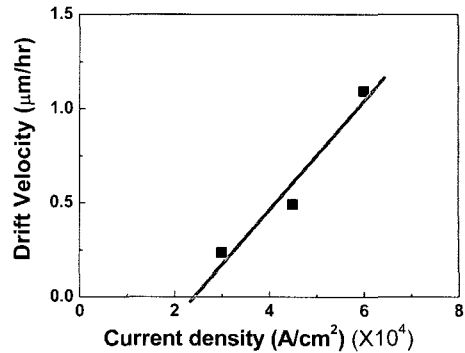


Fig. 9. Drift velocity of SnAgCu lines as a function of applied current density at  $140^\circ\text{C}$ .

## 4. 결 론

SnAgCu의 솔더 선형 시편을 만들어서 electromigration에 관련된 실험을 수행하여 활성화 에너지  $0.56 \text{ eV}$ 와  $DZ^*$  값을 구했다. 그리고 SnAgCu는 잠복 시간이 있고 SnPb는 잠복 시간이 나타나지 않았다. SnPb의 경우 Sn과 Pb의 확산도가 다르기 때문에 Pb가 먼저 이동을 하고 Sn이 이동을 하기 때문에 잠복 시간이 존재하고, SnAgCu는 Ag의 확산도가 크지만 솔더 안에서  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  화합물을 형성하기 때문에 잠복 시간에 영향을 주지 않는다. 그리하여 SnAgCu는 잠복 시간이 존재하지 않는다. 그리고 같은 온도 여러 전류 밀도에서 electromigration 실험을 수행하여 임계 전류 밀도를 계산해 본 결과  $140^\circ\text{C}$ 에서  $2.38 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  임을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국 과학 재단의 ERC 전자패키지 재료연구센터의 지원으로 이루어 졌습니다.

## 참고문헌

1. Y. C. Hsu, C. K. Chou, P. C. Liu, C. Chen, D. J. Yao, T. Chou and K. N. Tu, "Electro-migration in Pb-free SnAg3.8Cu0.7 solder stripes", J. Appl. Phys., Vol. 98, (2001) pp. 033523
2. S. Brandenburg and S. Yeh, Proceeding of the Surface Mount International 1998 Conference and Exposition (San Jose, C.A), (1998) pp. 337-340

3. I. A. Blech and C. Herring, "Stress generation by electromigration", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 29, (1976) pp. 131-133
4. 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, (2001) pp. 3189-3194
5. T. Y. Lee, K. N. Tu and D. R. Frear., "Electromigration of eutectic SnPb and SnAgCu Flip Chip Solder Bumps and Under-bump-metallization", *J. Appl. Phys.*, Vol. 90, (2001) pp. 4502-4508
6. T. Y. Lee, K. N. Tu and D. R. Frear., "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, (2003) pp. 5665-5671
7. S. K. Kang, D. Y. Shih, K. Fogel, P. Lauro, M. J. Yim, G. Advocate, M. Griffin, C. Goldsmith, D. W. Henderson, T. Gosselin, D. King, J. Konrad, A. Sarkhel and K. J. Puttlitz, "Interfacial Reaction Studies on Lead (Pb)-Free Solder Alloys", *Electronic Components and Technology Conference, Piscataway Eds, NJ* (2001)
8. 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)
9. J. R. Lloyd, "Electromigration in integrated circuit conductors", *J. Phys. D.*, Vol. 32, (1999) R109-R118
10. Brian F. Dyson, "Diffusion of Gold and Silver in Tin Single Crystals", *J. Appl. Phys.*, Vol. 37, (1966) pp. 2375-2377
11. Choong-Un Kim, J. W. Morris, Jr., and Hyuck-Mo Lee, "Kinetics of electromigration-induced edge drift in Al-Cu thin-film interconnects", *J. Appl. Phys.*, Vol. 82, (1997) pp. 1592-1598
12. M. Li, K. Y. Lee, D. R. Olsen, W. T. Chen, B. T. C. Tan, and S. Mhaisalkar, "Microstructure, Joint Strength and Failure Mechanism of SnPb and Pb-Free Solders in BGA Packages", *IEEE Transactions on Electronics Packaging*, Vol. 25, (2002) pp. 185-192
13. Y. T. Yeh, C. K. Chou, Y. C. Hsu, Chih Chen, and K. N. Tu, "Threshold current density of electromigration in eutectic SnPb solder" *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, (2005) pp. 203504