

## 리플로우 조건에 따른 Sn-52In 솔더범프의 전단응력과 전단에너지 비교

최재훈 · 오태성\*

홍익대학교 신소재공학과

### Comparison of Shear Strength and Shear Energy for 48Sn-52In Solder Bumps with Variation of Reflow Conditions

Jae-Hoon Choi and Tae-Sung Oh\*

Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Seoul 121-791

**초 록:** 솔더/UBM 계면반응에 따른 솔더범프의 기계적 신뢰성을 평가하기 위한 방안으로서 Cu UBM 상에서 리플로우한 Sn-52In 솔더범프의 리플로우 조건에 따른 전단응력과 전단에너지의 변화거동을 비교하였다. 리플로우 조건에 따른 전단에너지의 변화거동이 전단강도에 비해 Sn-52In/Cu 계면반응 및 파괴모드의 변화거동과 훨씬 잘 일치하여 솔더/UBM 계면반응에 따른 기계적 신뢰성을 분석하는데 전단에너지가 전단강도보다 훨씬 효과적인 평가 방안임을 알 수 있었다.

**Abstract:** Comparison of shear strength and shear energy of the 48Sn-52In solder bumps reflowed on Cu UBM were made with variations of reflow temperature from 150°C to 250°C and reflow time from 1 min to 20 min to establish an evaluation method for the mechanical reliability of solder bumps. Compared to the shear strength, the shear energy of the Sn-52In solder bumps was much more consistent with the solder reaction behavior and the fracture mode at the Sn-52In/Cu interface, indicating that the bump shear energy can be used as an effective tool to evaluate the mechanical integrity of solder/UBM interface.

**Keywords:** Electronic packaging, Sn-52In, Shear energy, Shear strength, Solder/UBM reliability

## 1. 서 론

최근 노트북 PC, 휴대폰, 개인정보단말기 등과 같은 각종 휴대형 정보통신기기를 위시하여 많은 전자제품들이 경량화, 슬림화 되고, 고기능화 됨에 따라 데이터 처리용량이 크게 증가하는 방향으로 나아가고 있다. 이를 위한 핵심적인 기술이 반도체를 비롯한 전자부품의 제조기술과 이들의 패키징 기술로, 최근 전자부품의 고성능화가 급속히 이루어짐에 따라 전자제품의 성능과 신뢰성이 칩

들 자체 또는 칩과 탄 주변 기기간의 신호전달을 이루고 지탱하여 주는 역할을 하는 전자 패키지의 성능에 의해 결정되고 있다<sup>1-3)</sup>.

소형화, 다핀화된 전자 패키지의 구현을 위해 area array의 솔더범프를 형성한 bare IC 칩을 PCB 나 flexible circuit carrier 등의 유기 기판에 직접 실장하는 저가격 플립칩 패키지 기술의 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>1-3)</sup>. 플립칩 패키지의 장점으로는 칩과 기판간의 접속부 길이가 최소화 되어 전기적 성능이 우수하며, 가장자리만을 접속경로로 활

\*Corresponding author  
E-mail: ohts@hongik.ac.kr

용하는 peripheral array가 아니라 area array 형태를 사용함으로써 I/O 집적도를 높일 수 있다. 또한, 25% 이상의 크기감소 효과를 얻을 수 있어 패키징 밀도를 증가시킬 수 있으며, 열방출의 경로를 분산시켜 내부의 열을 보다 빠르게 외부로 방출시킬 수 있다<sup>4)</sup>.

현재 플립칩 패키지 내의 솔더범프의 크기는 100  $\mu\text{m}$  정도로, 이와 같이 솔더범프가 미세화됨에 따라 플립칩 패키지 및 이를 채용한 전자기의 신뢰도가 플립칩 패키지내 솔더 접합부의 신뢰도에 의존하게 된다. 플립칩 패키지에서 솔더합금은 Under Bump Metallurgy (UBM)과의 금속학적 접합이 가능하도록 UBM 상에서 우수한 젖음성을 지녀야 한다. 반면에 솔더/UBM에서의 계면반응에 의한 금속간 화합물(IMC)의 성장속도가 너무 빠를 경우에는 UBM이 고갈되어 금속간화합물의 spalling이 발생하여 솔더 접합부의 신뢰도가 크게 저하하게 된다<sup>2)</sup>.

솔더/UBM 계면반응에 따른 솔더범프의 기계적 신뢰도는 일반적으로 볼 전단시험으로 측정된 전단강도 (shear strength)로 나타낸다<sup>5-7)</sup>. 그러나 범프 전단강도는 Fig. 1에서와 같이 볼 전단시험 중의 최대하중 값이기 때문에, 솔더/UBM 계면반응의 정도와 전단강도가 일치하지 않는 문제점이 있다. 솔더 리플로우 조건을 크게 변화시키더라도 전단강도 값이 거의 변하지 않는다고 보고되고 있다<sup>8,9)</sup>.

본 연구에서는 솔더/UBM 계면반응에 따른 솔더범프의 기계적 신뢰성에 대한 평가방안을 마련

하기 위해, Cu UBM 상에서 리플로우 한 Sn-52In 솔더범프의 기계적 신뢰성을 Fig. 1과 같이 ball shear 하중-변위 곡선 밑의 면적으로 표현되는 전단 에너지 (bump shear energy)로 분석하였다. 또한 리플로우 온도 및 시간에 따른 48Sn-52In/Cu 계면반응에 따른 전단에너지의 변화거동을 전단강도의 변화와 비교하였다. Sn-52In 솔더는 저융점 무연 솔더중의 하나로 평판 디스플레이인 LCD의 유리 기판에 IC 칩을 직접 실장하는 Chip on glass(COG) 접속기술에 적용이 가능한 솔더이다<sup>10,11)</sup>.

## 2. 실험방법

볼 전단시험 시편을 제조하기 위해 1000Å 두께의  $\text{SiO}_2$ 가 형성된 p형 Si 웨이퍼에 접착층으로서 0.1  $\mu\text{m}$ 의 Ti를 DC 마그네트론 스퍼터링법으로 스퍼터 증착 후, 그 위에 Sn-52In 솔더와의 반응을 위한 UBM 층으로 8  $\mu\text{m}$  두께의 Cu를 스퍼터 증착하였다. 이와 같은 Cu UBM 층 위에 48 wt% Sn-52 wt% In 솔더 리플로우시 솔더 마스크로 작용하기 위한 0.1  $\mu\text{m}$  두께의 Ti를 스퍼터 증착하였다. DC 마그네트론 스퍼터링법으로 박막을 증착시 박막 두께의 균일도를 향상시키기 위하여 기판을 4 rpm의 속도로 회전시켰다. Ti/Cu/Ti 층이 형성된 Si 웨이퍼에 photo-resist (PR)를 사용하여 지름 500  $\mu\text{m}$ 의 PR 패턴을 형성 후, 표면 Ti 층을 습식에칭함으로써 지름 500  $\mu\text{m}$ 의 Cu UBM 패드를 형성하였다.

상용 48 wt% Sn-52 wt% In 잉곳을 60  $\mu\text{m}$  두께로 압연 후 마이크로 펀칭법으로 직경 1.2 mm의 솔더 디스크를 제작하고 150°C로 유지된 RMA 플럭스에 담구어 구형 Sn-52In 솔더 비드를 제조하였다. 이와 같은 Sn-52In 솔더 비드를 Cu UBM 패드 위에 위치시킨 후, 150°C, 200°C, 250°C를 유지하는 RMA 타입의 플럭스 내에서 유지시간을 1분, 5분, 10분 및 20분으로 변화시키며 리플로우 하였다. 리플로우된 시편을 에폭시 레진을 사용하여 마운팅 하고 연마하였다. 48Sn-52In/Cu 계면에 형성된 금속간화합물을 관찰하기 위해 10 ml HF, 10 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$  및 80 ml  $\text{H}_2\text{O}$  조성의 에칭용액을 사용하여 시편을 선택적으로 에칭하였다. 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy: SEM)의 Back-scattered electron image(BEI) 모드를 사용하여 리플로우 조건에 따른 48Sn-52In/Cu 계면의 미세구

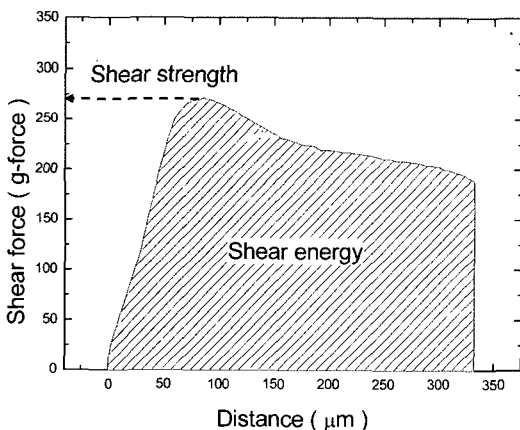


Fig. 1. Schematic illustration of the ball shear force-displacement curve.

조를 관찰하고, 계면에 형성된 금속간화합물의 조성은 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 이용하여 분석하였다.

150°C~250°C에서 1분~20분 동안 리플로우한 48Sn-52In 솔더범프의 전단에너지 및 전단강도 측정을 위한 볼 전단시험은 DAGE-BT4000 전단시험기를 사용하여 솔더 마스크로부터 150 μm 떨어진 높이에서 100 μm/sec의 전단 속도로 수행하였다. 이때 각 리플로우 조건당 최소 20개의 솔더 범프를 전단 시험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Figs. 2, 3 및 4에 각기 150°C, 200°C 및 250°C에서 1분~20분 리플로우한 48Sn-52In/Cu 계면의 미세구조를 나타내었다. EDS 분석결과, Sn-52In 솔더와 Cu와의 반응에 의해 계면에 형성된 금속간화합물은 리플로우 온도(150°C~250°C) 및 시간(1분~20분)의 모든 조건에서 모두 Cu : In : Sn의 비가 56.0 : 17.7 : 26.3(at%)인 Cu<sub>6</sub>(Sn,In)<sub>5</sub> η상으로 분석되었다. Chuang 등<sup>12)</sup>은 Cu UBM 상에서 리플로우한 Sn-51In에 대한 계면 금속간화합물을 분석하여 리플로우 온도가 300°C 이상일 경우에는 Sn-51In/Cu 계면에 평평한 형상의 Cu<sub>3</sub>(Sn,In), ε상이 형성되나 300°C 이하의 온도에서 리플로우 한 경우에는 조개꼴 (scallop) 형상의 Cu<sub>6</sub>(Sn,In)<sub>5</sub> η상만이 형성된다고 보고하였으며 이는 본 연구의 결과와 잘 일치하는 것이다.

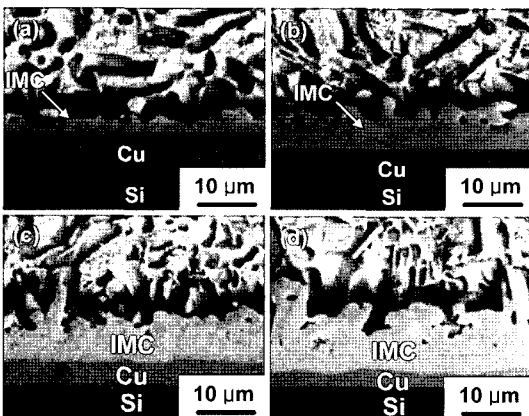


Fig. 2. Scanning electron micrographs of the Sn-52In/Cu interface reflowed for (a) 1 min, (b) 5 min, (c) 10 min, and (d) 20 min at 150°C.

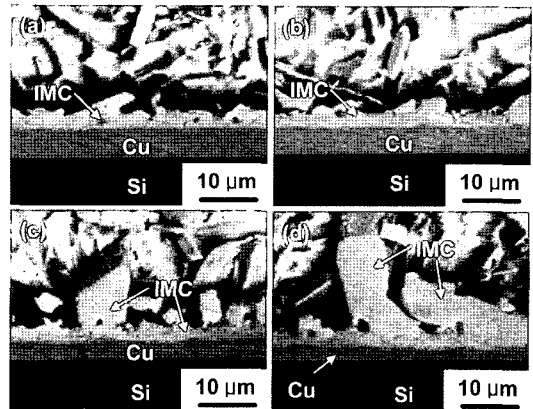


Fig. 3. Scanning electron micrographs of the Sn-52In/Cu interface reflowed for (a) 1 min, (b) 5 min, (c) 10 min, and (d) 20 min at 200°C.

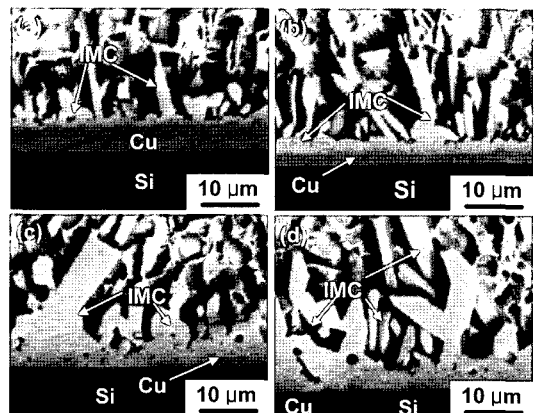


Fig. 4. Scanning electron micrographs of the Sn-52In/Cu interface reflowed for (a) 1 min, (b) 5 min, (c) 10 min, and (d) 20 min at 250°C.

솔더반응에 의한 금속간화합물의 성장거동은 리플로우 온도 및 시간에 따른 금속간화합물의 두께를 측정함으로써 평가할 수 있다. 그러나 금속간화합물은 일반적으로 Figs. 2, 3, 4에 있는 조개꼴 형상처럼 복잡한 형상을 지니고 있고 국부적으로 크게 자라거나 또는 심하게 리플로우 된 경우에는 spalling 되기도 하기 때문에, 금속간화합물의 두께를 정확히 측정하는 것은 어려운 것이다. 따라서 본 연구에서는 금속간화합물의 성장속도가 UBM의 소모속도에 비례한다는 가정<sup>13)</sup>하에 금속간화합물의 두께 대신에 리플로우 조건에 따른 Cu UBM의 소모속도를 분석하였다.

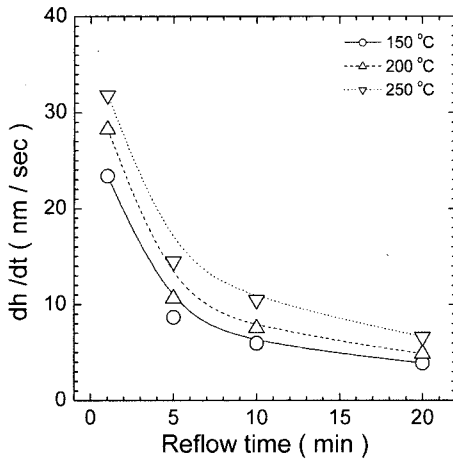


Fig. 5. Thickness reduction rate,  $dh/dt$ , of Cu UBM as a function of reflow time for Sn-52In solder bump at each reflow temperature.

각 리플로우 온도에서 리플로우 시간에 따른 Cu UBM의 두께 변화를 측정하여 Cu UBM의 소모속도  $dh/dt$ 를 계산하였으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. Cu UBM의 소모속도는 1분 리플로우시 150°C에서는 23.4 nm/sec, 200°C에서는 28.3 nm/sec, 250°C에서는 31.8 nm/sec 이었으나, 20분 리플로우시에는 Cu UBM의 소모속도가 150°C에서는 2.0 nm/sec, 200°C에서는 5.2 nm/sec, 250°C에서는 10.5 nm/sec로 감소하였다. 63Sn-37Pb 솔더를 240°C에서 1분간 리플로우시 Cu의 소모속도는 3.84 nm/sec로 보고<sup>14)</sup>되고 있어, Sn-37Pb 솔더에 비해 Sn-52In 솔더에서 Cu의 소모속도가 매우 높음을 알 수 있다. 이는 Sn-37Pb 솔더의 Pb는 Cu와 반응하지 않아 리플로우시 Cu의 소모에 영향을 미치지 않는 반면에 Sn-52In 솔더에서는 Sn 뿐만 아니라 In도 솔더반응에 참여하기 때문으로 판단된다.

Cu UBM 상에서 48Sn-52In 솔더를 150°C~250°C에서 리플로우시 리플로우 시간에 따른 솔더범프의 전단강도를 Fig. 6에 나타내었으며, 볼 전단하중-변위 곡선 밑의 면적(Fig. 1)으로 표현되는 전단에너지의 측정값을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 전단강도의 경우에는 리플로우 온도와 시간에 따른 경향성을 나타내지 않으나, Fig. 7에 있는 전단에너지 측정결과는 리플로우 조건에 따라 일정한 경향성을 나타내었다.

Fig. 6에서와 같이 150°C에서 리플로우 한 Sn-

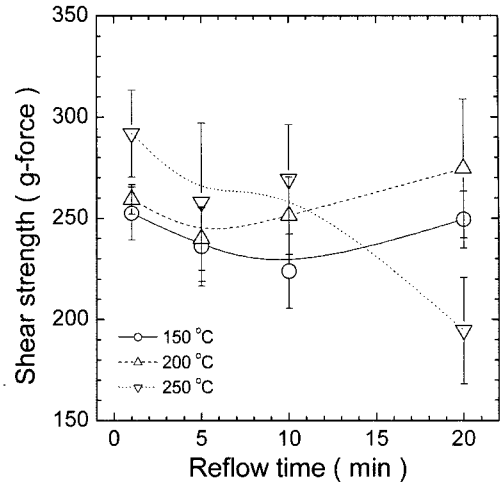


Fig. 6. Ball shear strength of the Sn-52In solder bumps on Cu UBM as a function of reflow time at each reflow temperature.

52In 솔더범프의 전단강도는 리플로우 시간이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으나, 250°C에서 리플로우 한 시편의 경우에는 리플로우 시간이 증가할수록 전단강도가 증가하는 서로 상반된 경향을 나타내었다. 리플로우 온도에 따른 전단강도의 비교에서도 250°C에서 리플로우 한 시편의 경우 Fig. 4에서의 같이 UBM 층이 다 소멸되었음에도 불구하고 전단강도가 Cu UBM이 남아 있는 200°C 리플로우 시편보다 더 높게 나타나는 등 Sn-52In/Cu 계면반응과는 일치하지 않는 결과를 나타내었다.

반면에 Fig. 7에 나타낸 리플로우 온도 및 시간에 따른 전단 에너지의 변화거동은 Sn-52In/Cu 계면반응과 잘 일치하는 결과를 나타내었다. Cu UBM 층이 다 소멸된 250°C에서 리플로우 한 시편의 경우에는 150°C 및 200°C에서 리플로우 한 시편에 비해 낮은 전단 에너지 값을 나타내었다. 150°C에서 리플로우 한 시편에 비해 200°C에서 리플로우 시편이 더 낮은 전단에너지 값을 나타낸 이유는 이 두 리플로우 조건의 시편에서 모두 Cu UBM이 남아 있으므로 전단에너지의 저하가 솔더와의 반응에 의한 UBM의 소모 정도의 차이에 기인한다기보다는 150°C에서 리플로우 한 시편에 비해 200°C에서 리플로우 한 시편에서 솔더 합금의 결정립 조대화에 의해 솔더 합금의 강도가 저

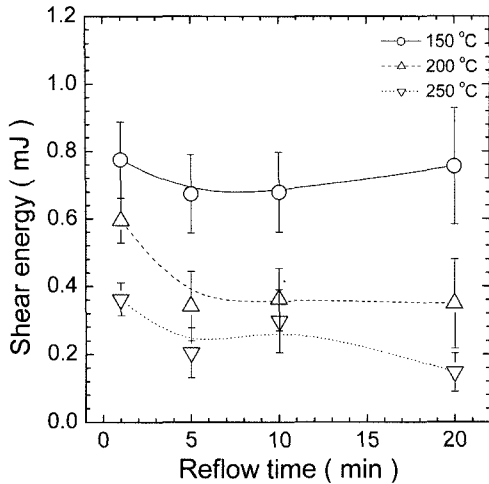


Fig. 7. Ball shear energy of the Sn-52In solder bumps on Cu UBM as a function of reflow time at each reflow temperature.

하하는데 기인한다고 판단할 수 있다. 150°C~250°C의 리플로우 온도에서 모두 리플로우 시간을 1분에서 5분으로 증가시킴에 따라 전단에너지가 감소하지만 5분 이상 리플로우시에는 전단에너지의 변화가 거의 나타내지 않았다. 이와 같은 리플로우 시간에 따른 전단에너지의 변화기동은 Fig. 6에서와 같이 1분 이상 리플로우시 Cu UBM의 소모속도가 급격히 저하하며, 또한 리플로우 후 Sn-52In 솔더합금의 결정립 크기는 액상에서 고상으로의 냉각속도에 주로 의존하기 때문<sup>15,16)</sup>에 동일한 리플로우 온도에서의 유지시간 차이가 솔더합금의 결정립 크기에 미치는 영향이 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8에 48Sn-52In 솔더범프의 전단시험 후 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 미세구조 사진을 나타내었다. 150°C와 200°C에서 리플로우 한 시편의 경우 Fig. 8(a) 및 (b)와 같이 많은 부분에서 연성파괴가 솔더 합금 내로 진행되었다. 200°C 시편의 경우에는 1분간 리플로우한 것임에도 불구하고 150°C에서 5분간 리플로우 한 시편보다도 솔더 합금내로의 연성파괴 부위가 감소하여 기계적 신뢰성이 150°C에서 5분간 리플로우한 시편보다 저하할 것임을 알 수 있다. 250°C에서 리플로우 한 시편의 경우에는 1분 리플로우 시에도 48Sn-52In/Cu 계면의 상당부분에서 금속간화합물

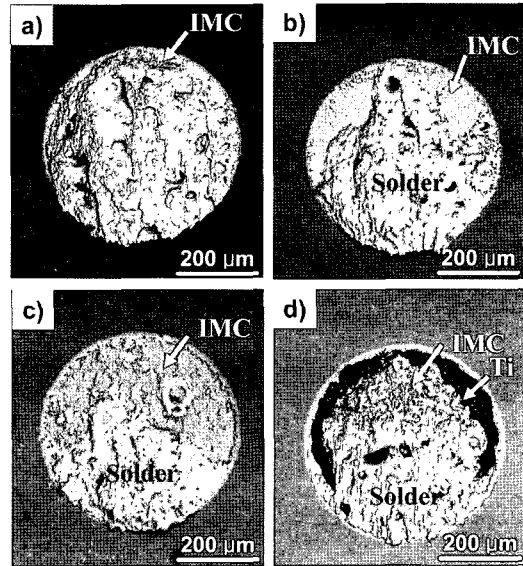


Fig. 8. Scanning electron micrograph of the fracture surface after ball shear test of the Sn-52In solder bump reflowed on Cu UBM (a) at 150°C for 5 min, (b) at 200°C for 1 min, (c) at 250°C for 1 min, and (d) at 250°C for 10 min.

을 따라 취성파괴가 진행되었으며 10분간 리플로우 한 경우에는 Cu UBM이 거의 소진되어 금속간 화합물과 Ti 사이에서도 박리가 일어나는 것이 관찰되어 기계적 신뢰성이 150°C 및 200°C에서 리플로우 한 시편에 비해 낮을 것임을 예측할 수 있다. 이와 같이 파괴면의 파괴모드로부터 예측한 기계적 신뢰도 특성을 Fig. 6에 있는 전단강도 값 및 Fig. 7에 있는 전단에너지 값과 비교해보면 전단에너지의 측정값이 판단모드로부터 예측한 기계적 신뢰성과 훨씬 더 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 150°C에서 5분간 리플로우한 시편과 250°C에서 10분간 리플로우 한 시편의 파단면을 비교하면 솔더 합금내에서 연성파괴가 진행된 150°C/5분 리플로우 시편의 기계적 신뢰성이 취성파괴가 발생한 250°C/10분 리플로우 시편에 비해 훨씬 우수할 것으로 예측되나, Fig. 6에 나타난 전단강도는 250°C/10분 리플로우한 시편이 더 높은 값을 나타내어 파단면에서 관찰한 파괴거동과 상반된 결과를 나타내었다. 반면에 Fig. 7에서와 같이 전단에너지 값은 150°C/5분 리플로우 시편이 250°C/10분 리플로우한 시편에 비해 훨씬 높

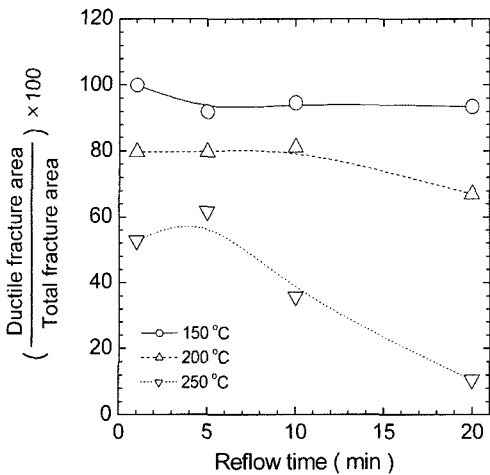


Fig. 9. Area ratio of the ductile fracture region on fracture surface after ball shear test of the Sn-52In solder bumps as a function of reflow time at each reflow temperature.

은 값을 나타내어 파단면 관찰로부터 예측한 기계적 신뢰성과 잘 일치한다.

솔더/UBM 계면에서 균열이 전파시 솔더 합금 내로 균열이 전파하는 연성파괴가 금속간화합물 내 또는 금속간화합물과 Ti 층 사이로 균열이 전파하는 취성파괴보다 어렵기 때문에,<sup>15)</sup> 솔더범프의 기계적 신뢰성은 솔더/UBM 계면에서의 파괴 모드에 의존하게 된다. 따라서 솔더범프의 전단시험 후 파단면을 관찰시 솔더 합금내에서 균열이 전파한 연성파괴면적이 증가할수록 솔더/UBM의 기계적 신뢰성이 우수할 것임을 예측할 수 있다. 150°C~250°C에서 1분~20분 리플로우한 Sn-52In 솔더범프의 파단면을 관찰하여 전체 파단면의 면적에서 솔더합금 내에서 균열이 전파한 연성파괴가 차지하는 면적의 비 (연성파괴면적/파단면 면적)를 구하였으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 나타난 연성파괴면적/파단면 면적의 비는 파괴모드로부터 예측할 수 있는 Sn-52In/Cu 시스템의 기계적 신뢰성으로 고려할 수 있다. 파단면에서 예측한 Sn-52In/Cu의 기계적 신뢰성의 리플로우 온도 및 시간에 따른 변화거동은 Fig. 7에 나타난 전단에너지의 변화거동과 매우 잘 일치하였으나, Fig. 6에 나타난 전단강도의 변화거동과는 전혀 일치하지 않았다. 이와 같은 결과로부터 전단강도보다는 전단에너지가 솔더/UBM간의 계면반

응에 따른 기계적 신뢰성을 분석하는 매우 효과적인 평가방안임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) 리플로우 조건에 따른 Sn-52In/Cu 계면반응 및 파괴모드의 변화거동과 전단에너지의 변화거동이 전단강도보다 훨씬 잘 일치하여 솔더/UBM 계면반응에 따른 기계적 신뢰성을 분석하는데 전단에너지가 훨씬 중요한 평가방안이 될 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 리플로우 온도 및 시간에 따른 Sn-52In/Cu 계면반응과 Sn-52In 솔더범프에 대해 측정된 전단에너지의 변화거동이 매우 잘 일치하였으나, 전단강도의 경우에는 리플로우 온도와 시간에 따른 계면반응으로부터 파악할 수 있는 경향성을 나타내지 않았다.

(3) Cu UBM에서 리플로우 한 Sn-52In 솔더범프의 전단시험 후 파단면에서 연성파괴면적이 차지하는 비를 구하였으며, 이를 파괴모드로부터 예측한 Sn-52In/Cu의 기계적 신뢰성으로 고려하였다. Sn-52In/Cu의 파단면에서 분석한 연성파괴면적/파단면 면적의 변화거동은 전단에너지의 변화거동과 매우 잘 일치하였으나, 전단강도의 변화거동과는 전혀 일치하지 않았다.

(4) Sn-52In 솔더를 Cu UBM 상에서 150°C~250°C의 온도에서 1분~20분 리플로우시 리플로우 온도 및 시간에 무관하게 Sn-52In/Cu 계면에서 scallop 형상의  $Cu_6(Sn,In)_5$   $\eta$ 상이 형성되었다.

(5) Sn-52In 솔더를 Cu UBM에서 1분간 리플로우시 Cu의 소모속도가 150°C에서는 23.4 nm/sec, 200°C에서는 28.3 nm/sec, 250°C에서는 31.8 nm/sec로, 63Sn-37Pb 솔더를 240°C에서 1분 리플로우시 Cu의 소모속도 3.84 nm/sec에 비해 매우 높은 값을 나타내었다. 이는 Sn-37Pb의 Pb는 Cu와 반응하지 않아 리플로우시 Cu의 소모에 영향을 미치지 않는 반면에 Sn-52In에서는 Sn 뿐만 아니라 In도 솔더반응에 참여하기 때문으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 국제협력(공동)연구(과제번호: F01-2004-000-102420)에 의해 이루어

쳤으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. K. N. Tu and K. Zeng, *Mater. Sci. Eng.*, 34 1 (2001).
2. C. A. Harper, "Electronic Packaging and Interconnection Handbook", McGraw-Hill, New York p. 124 (2000).
3. D. R. Frear, S. N. Burchett, H. S. Morgan, and J. H. Lau, "The Mechanics of Solder Alloy Interconnects", Van Nostrand Reinhold, New York p.74, (1994).
4. P. S. Ho, G. Wang, M. Ding, J.-H. Zhao, and X. Dai, *Microelectron. Reliab.*, 44, 719 (2004).
5. N. Duan, J. Scheer, J. Bielen, and M. van Kleef, *Microelectron. Reliab.*, 43, 1317 (2003).
6. O. Unal, D. J. Bernard and I. E. Anderson, *Scripta Mater.*, 40, 271 (1999).
7. A. Soper, G. Pozza, M. Ignat and G. Parat, *Microelectron. Reliab.*, 37, 1783 (1997).
8. R. Erich, R. J. Coyle, G. Wenger, A. Primavera, *Proc. IEEE/CPMT Int. Electronics Manufacturing Technol. Symp.*, (IEEE, 1999) pp.16-22.
9. Y. C. Chan, A. C. K. So, J. K. L. Lai, *Mater. Sci. Eng.*, B55, 5 (1998).
10. U. B. Kang and Y. H. Kim, *Proc. 2001 Int. Symp. Electronic Materials & Packaging*, 129-134 (2001).
11. J. H. Choi, K. Y. Lee, S. W. Jun, Y. H. Kim and T. S. Oh, *Mater. Trans.*, 46, 1042 (2005).
12. T. H. Chuang, C. L. Yu, S. Y. Chang and S. S. Wang, *J. Elec. Mater.*, 31, 640 (2002).
13. J. W. Jang, P. G. Kim, K. M. Tu, D. R. Frear, and P. Thompson, *J. Appl. Phys.*, 85, 8456 (1999).
14. H. K. Kim and K. N. Tu, *Phys. Rev.*, 53 (1996).
15. J. W. Choi, K. W. Kee, H. S. Cha, and T. S. Oh, *Korean J. Mater. Res.*, 10, 790 (2000).
16. J. S. Hwang, "Solder Paste in Electronics Packaging", VNR, New York p. 90 (1992).