

컴포넌트에서의 비정상적인 금속간화합물 성장이 보드 레벨 기계적 신뢰성에 미치는 영향

최재훈* · 함현정 · 황재선 · 김용현 · 이동춘 · 문점주
삼성전자, Device Packaging 센터

The Effect of Abnormal Intermetallic Compounds Growth at Component on Board Level Mechanical Reliability

Jae-Hoon Choi*, Hyon-Jeong Ham, Jae-Seon Hwang, Yong-Hyun Kim,
Dong-Chun Lee and Jeom-Ju Moon

Device Packaging Center, SAMSUNG Electronics,
#723 Buksu-Ri, Baebang-Myeon, Asan-City, Chungcheongnam-Do, Korea

초 록: 컴포넌트에서의 비정상적인 금속간화합물 성장이 보드 레벨 기계적 신뢰성에 미치는 영향을 연구하기 위하여, 전기 도금된 Ni/Au UBM과 Sn2.5Ag0.5Cu 솔더의 리플로우 횟수 및 고온 시효 시간에 따른 금속간 화합물 성장거동을 관찰하였다. 각 조건별로 처리된 컴포넌트에서 솔더 접합부의 기계적 특성을 비교하기 위하여, 전단 속도 변화에 따른 볼 전단 시험을 실시하여 전단에너지 값을 측정하였다. 마지막으로, 보드 레벨에서의 기계적 신뢰성 시험을 위하여 조건별로 처리된 컴포넌트를 PCB 보드에 실장하여, 3점 굽힘 시험 및 충격 시험을 실시한 후 파괴모드를 분석하였다.

Abstract: In this paper, we studied how and why did abnormal IMC growth at component affect on board level mechanical reliability. First, interfacial reactions between Sn2.5Ag0.5Cu solder and electrolytic Ni/Au UBM of component side were investigated with reflow times and thermal aging time. Also, to compare mechanical reliability of component level, shear energy was evaluated using the ball shear test conducted with variation of shear tip speed. Finally, to evaluate mechanical reliability of board level, we surface-mounted component fabricated with each condition on PCB side. After conducting of 3 point bending test and impact test, we confirmed solder joint crack mode using cross-sectioning and dye & pry penetration method.

Keywords: Solder, UBM, Shear, Bending, Impact, Crack

1. 서 론

Pb의 환경 규제에 따라 Pb-free 솔더를 사용함에 따라, 재료 자체의 물리적 물성 변화가 발생됨으로써 SnPb계 솔더를 사용하였을 때에 나타나지 않았던 신뢰성 문제점들이 Pb-free 솔더를 사용하면서 발생

되고 있다.¹⁾ 특히, 하나의 컴포넌트 내에 모든 솔더 접합면들이 Fig. 1(a)와 같이, 동일한 모드 2 파괴(Fig. 1(b) 참조)로 솔더 접합부 크랙이 발생되면서, 취성을 갖는 금속간화합물 내로 전파되어 파괴면은 마치 솔더가 UBM에 젖지 않은 상태처럼 관찰된 것을 경험한 적이 있다. 이와 같은 불량에

*Corresponding author
E-mail: jhoony.choi@samsung.com

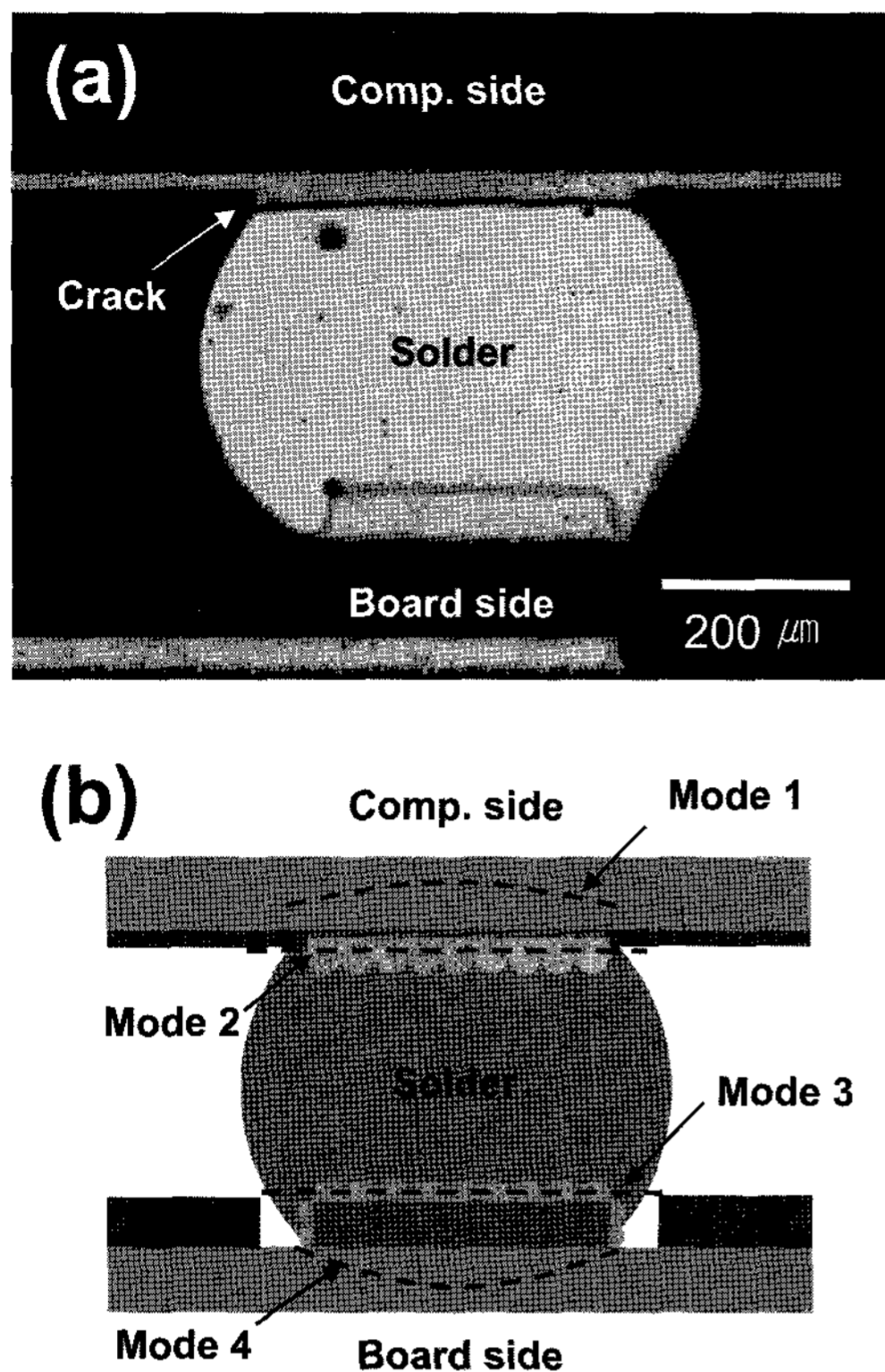


Fig. 1. (a) The optical microscope image for solder joint crack and (b) schematic diagram of the solder joint crack mode.

대해서 컴포넌트 쪽의 금속간화합물 성장이 정상 컴포넌트에 비해 많다는 점 외에는 아직까지 정확한 원인에 대해서 밝혀진 것은 없다.

일반적으로 컴포넌트 레벨에서 솔더 접합부의 기계적 신뢰성을 시험하는 방법으로는 볼 전단 시험법과 볼 인장 시험법이 많이 사용되고 있다.²⁾ 또한, 컴포넌트가 PCB 보드에 실장된 후의 보드 레벨에서는 굽힘 시험,³⁾ 낙하 충격 시험⁴⁾ 등이 사용되고 있으며, 이와 같은 기계적 신뢰성 시험법들은 IPC(the Institute for Printed Circuits), JEDEC(the Joint Electron Devices Engineering Council)에서 국제 규격으로 세부 시험법들에 대해서 규정해 놓고 있다. 또한, 일부 연구자들에 의해 컴포넌트 레벨과 보드 레벨의 기계적 신뢰성의 상관 관계 및 사용자 환경에 맞는 기계적 신뢰성 시험법들이 계속해서 고안되고 있다.⁵⁾

DRAM, 수동소자, 능동소자들이 PCB에 실장되

어 있는 메모리 모듈은 작업자 및 사용자들에 의해 소켓 삽입/출될 때 무리한 힘이 사용되는 경우가 있으며, 이와 같은 경우에 메모리 모듈의 굽힘 응력이 인가되어 솔더 접합부 크랙을 발생시킬 수 있다. 또한, 소자들이 외부로 노출되어 있기 때문에 외부와 부딪힘 및 충돌에 의해 수동소자 크랙, 컴포넌트 크랙 등이 발생되어 시스템 부팅 불량을 발생시킬 수 있다. 하지만, 아직까지 외부 물체가 컴포넌트와의 순간적인 부딪힘 충격에 대한 보드 레벨에서의 기계적 신뢰성에 대해서는 정립이 되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 컴포넌트 쪽의 금속간화합물 성장이 보드 레벨 기계적 신뢰성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서 연구하였다. 먼저, 리플로우 횟수 및 고온 시효 시간에 따라 전기도금된 Ni/Au와 Sn2.5Ag0.5Cu 솔더의 계면 반응 분석과 금속간화합물의 성장거동에 따른 볼 전단 시험을 실시하였으며, 조건별로 처리된 컴포넌트를 PCB 보드에 실장하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다. 또한, 본 연구에서는 컴포넌트 충격 시험을 제안하여, 외부 물체에 의한 충격에 의해 솔더 접합면 크랙 발생으로 보드 레벨 기계적 신뢰성에 어떠한 영향을 주는지 시험하였다. 결국, 서두에서 언급한 Pb-free 솔더에서의 비정상적인 모드 2 솔더 접합부 크랙을 재현함으로써 발생 원인을 파악할 수 있었다.

2. 실험방법

본 연구를 위해서 삼성전자에서 생산되고 있는 BOC(Board on Chip) 컴포넌트와 BOC 컴포넌트가 실장된 UDIMM(Unbuffered Dual Inline Memory Module)를 이용하였다. 먼저, 계면반응 연구를 위해 Sn2.5Ag0.5Cu 솔더가 전기도금 Ni/Au에 접합되어 있는 BOC 컴포넌트를 최대 온도 250°C, soak time이 60초인 온도 프로파일을 이용하여 리플로우를 1회에서 최대 20회까지 진행하였다. 또한, 고온 시효를 위해서 125°C의 온도에서 최대 1000 시간까지 유지하였다. 솔더 접합부의 금속간화합물의 두께, 조성 등의 계면반응을 관찰하기 위하여 FIB(Focused Ion Beam), SEM(Scanning Electron Microscope), EDS(Energy Dispersive Spectrometer)를 이용하였다.

기계적 신뢰성 시험을 위하여, 컴포넌트 레벨에

서는 볼 전단 시험을 전단 팁 속도를 500 $\mu\text{m/s}$ 와 1 m/s로 진행하였으며, 각 조건별로 처리된 컴포넌트의 볼 전단 에너지 값을 구하였다. 전단 시험 후 솔더 접합부의 파괴 모드를 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였다. 또한, 보드 레벨 기계적 신뢰성을 위하여 각 조건별로 처리된 컴포넌트를 UDIMM으로 제작하여, MTS사의 만능시험기(858 Table Top System)를 이용하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다. 굽힘 시험 후 전기적 테스트를 통하여 fail여부를 판단하여 수명 cycle로 나타내었으며, 일반적으로 신뢰성에서 통계적 tool로 사용되고 있는 와이블 통계를 이용하여 대표수명값을 산출하였다. 마지막으로 보드 레벨에서 충격 테스트를 위하여 10 g의 구형 추를 UDIMM 상에 컴포넌트 위치로 40, 60, 80, 100 cm에서 자유낙하 시켰다. 보드 레벨 기계적 신뢰성 시험 후에는 Dye & Pry 법과 단면 폴리싱을 통해 파괴모드를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Sn2.5Ag0.5Cu 솔더와 Ni/Au간의 계면 반응

리플로우 횟수와 고온시효 시간에 따른 Sn2.5Ag 0.5Cu 솔더와 전기도금된 Ni/Au간의 계면을 FIB로 관찰하여 Fig. 2에 나타내었다. 계면을 EDS 분석한 결과, 처리조건에 상관없이 2가지 조성의 금

속간화합물이 관찰되었다. 즉, Ni쪽에는 Sn:Cu:Ni의 원자 함량비가 56.0:17.7:26.3인 $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ 금속간화합물이, 솔더쪽에는 44.8:32.1:23.1인 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물이 성장되어 있음을 확인하였다. 일반적으로 SnAgCu계 솔더와 Ni UBM간의 반응으로 $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ 와 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 두가지 형태의 금속간화합물이 생성된다고 보고⁶⁾되고 있으며, 본 연구에서도 이를 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 3과 같이 리플로우시에는 액상 솔더와 고상 UBM과의 반응으로 고상솔더와 고상 UBM이 반응하게 되는 고온시효의 경우보다 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 및 $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ 금속간화합물 성장이 급격함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 복잡한 형태의 금속간 화합물의 두께 측정을 위해서 금속간화합물의 면적을 측정한 후 두께로 환산하였다.

리플로우시에는 액상 솔더와의 반응 표면적 증가를 위해 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물 형상에 영향을 주었음을 알 수 있었으며, Fig. 2(d)와 같이 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 와 $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ 사이에 void가 발생하였음을 확인하였다. 이와 같은 void는 리플로우 횟수 증가시 크기와 갯수가 증가되는 것을 관찰할 수 있었으나, 고온시효시에는 void를 발견할 수 없었다. 결국, 두 금속간화합물 사이의 void는 Sn, Cu, Ni 원자의 상호 확산속도 차이로 인해 발생되는데,⁷⁾ 확산속도가 빠른 리플로우에서는 용융솔더로부터

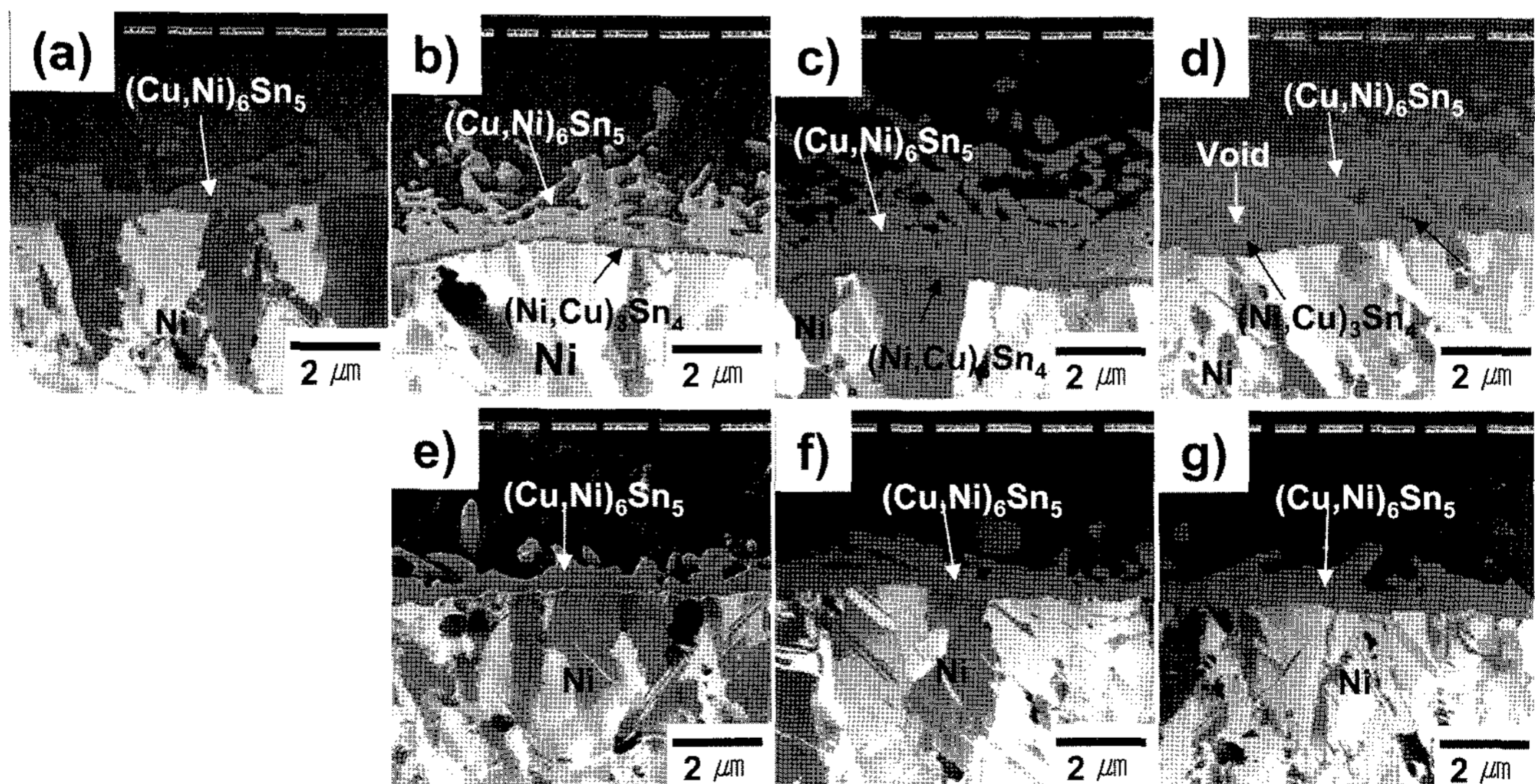


Fig. 2. The FIB images of Sn2.5Ag0.5Cu/UBM interface with variation of reflow times; (a) As reflowed, (b) 5, (c) 10 and (d) 20 times, and aging time; (e) 250, (f) 500, and (g) 1000 hours.

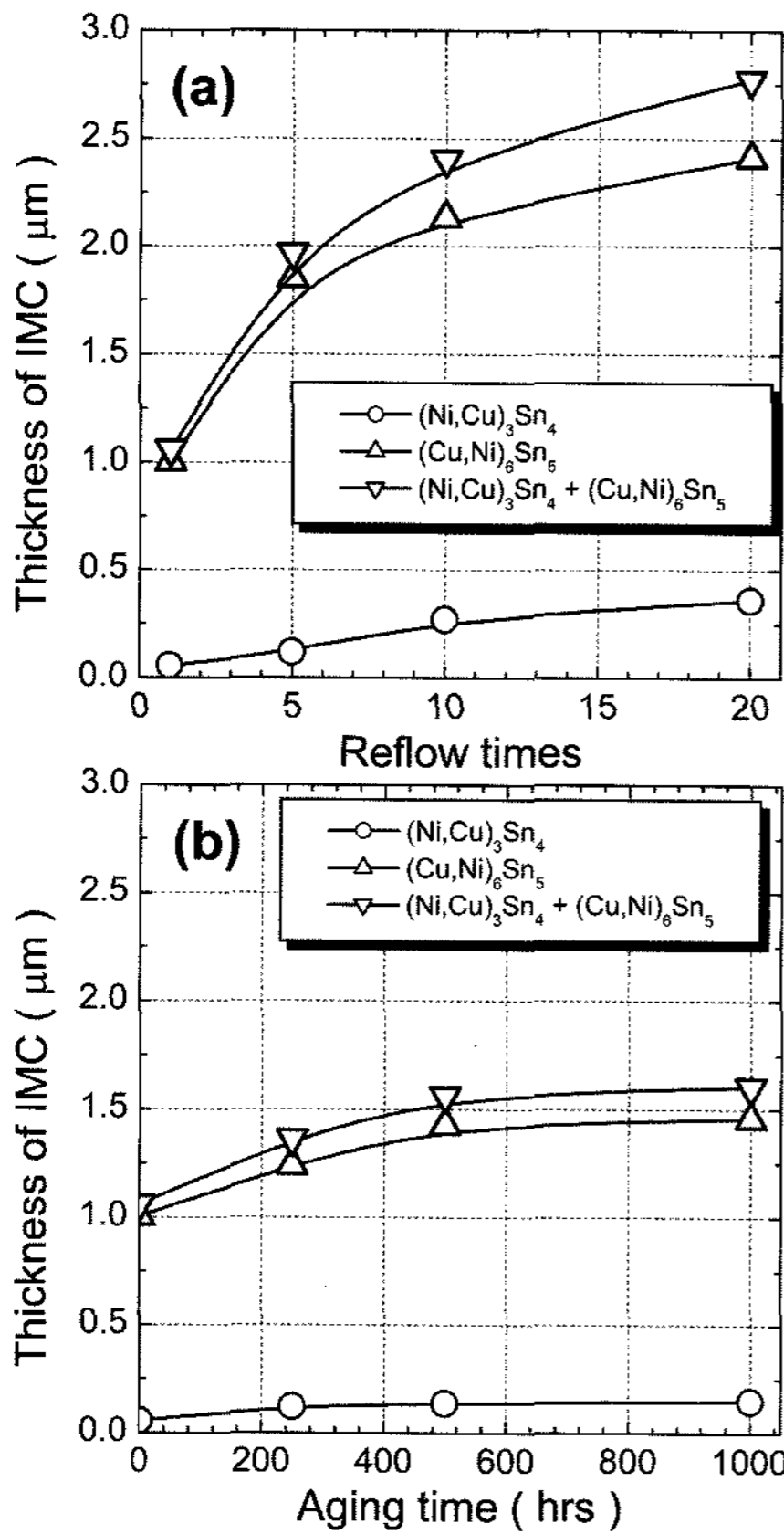


Fig. 3. The IMC thickness with variation of (a) reflow times and (b) aging time.

Sn 공급이 고상 UBM으로부터 Ni, Cu보다 많기 때문에 void가 발생된다. 하지만, 상대적으로 확산 속도가 느린 고온시효에서는 void가 발생되지 않은 것으로 사료된다.

3.2. 볼 전단 시험

각 조건별로 처리된 시편에 대해 볼 전단시험을 하였으며, 이를 바탕으로 Ni/Au UBM과 Sn2.5Ag0.5Cu 솔더 접합부의 볼 전단에너지를 분석하였다. 일반적으로 솔더범프의 기계적 신뢰도는 볼 전단시험을 사용하여 측정된 전단강도 값으로 나타내고 있으나, Fig. 4와 같이 볼 전단시험 시의 최대하중 값으로 나타내는 볼 전단강도는 솔더/UBM 계면반응의 정도와 일치하지 않는 문제점이 있다. 즉, 솔더 리플로우 조건을 크게 변화시키더라도 볼 전단강도 값은 거의 변하지 않으며, 오히려 전단강도

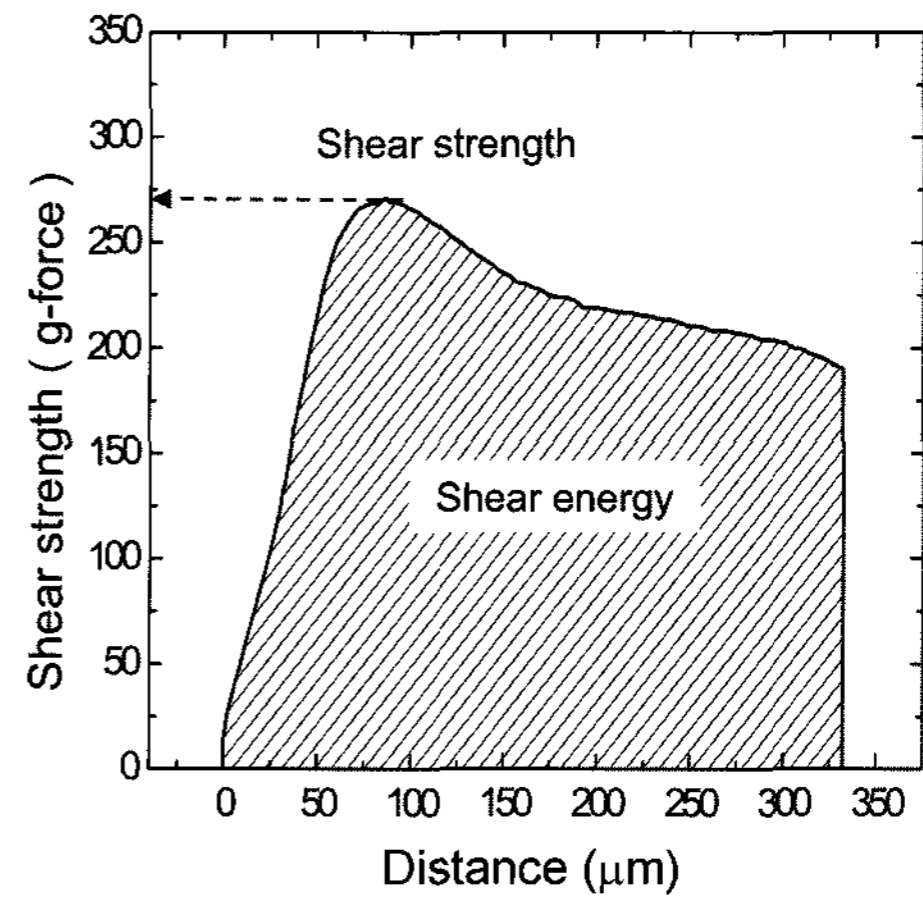


Fig. 4. The schematic diagram illustrating ball shear strength and shear energy.

값에 비해 Fig. 4와 같이 볼 전단시험 시 하중-변위 곡선 밑의 면적으로 표현되는 전단에너지값이 솔더와 UBM간의 계면 신뢰성을 대변될 수 있다고 보고되고 있다.^{8,9)}

또한, 최근 일부 연구자들에 의하여 볼 전단시험에서 빠른 전단 속도가 휴대용 전화기와 같은 소형화된 제품을 사용자 실수에 의해 떨어뜨렸을 경우에 발생하는 솔더 접합부 크랙을 대변될 수 있다는⁶⁾ 결과들이 보고되고 있으며, 본 연구에서도 전단시험 속도를 500 µm/sec와 1 m/sec로 변화시켜 낙하 충격에서의 솔더접합부 크랙 모드를 예상하여 보았다.

Fig. 5는 조건별로 처리된 시편의 전단에너지값을 전단시험 속도에 따라 비교하였다. 500 µm/sec의 전단시험 속도로 시험시 리플로우 횟수 및 고온시효시간에 관계없이 전단에너지값의 경향을 알 수 없었다. 반면, 1 m/sec로 전단시험을 실시한 경우에는 리플로우 횟수에 증가하면서 전단에너지값은 급격히 감소하는 경향을 나타내었으나, 고온시효 시간에 따라서는 경향 변화가 발생되지 않았다.

전단시험 후 파괴면은 Fig. 6와 같이, 금속간화합물에서 파괴가 발생하는 취성파괴, 솔더에서 파괴가 발생하는 연성파괴, 취성파괴와 연성파괴가 혼합되어 있는 혼성파괴, 마지막으로 UBM과 기판사이에서 파괴가 발생하는 패드 리프트 현상으로 나눌 수 있었다. 전단시험 속도를 500 µm/sec로 시험을 한 경우는 100% 연성파괴가 이루어졌지만,

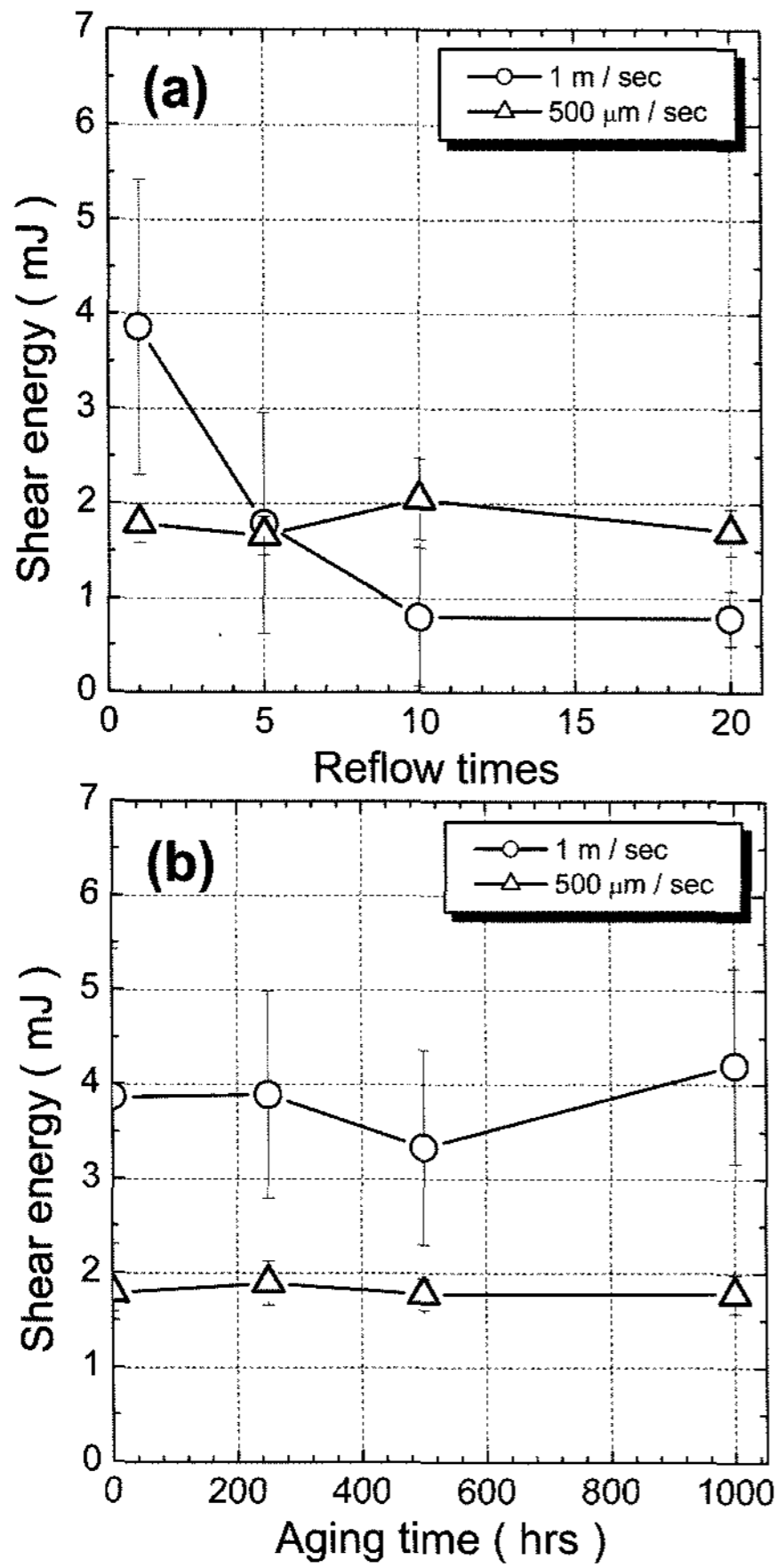


Fig. 5. The ball shear energy of the Sn2.5Ag0.5Cu solder bumps on Ni/Au UBM as a function of shear tip speed with variation of (a) reflow times and (b) aging time.

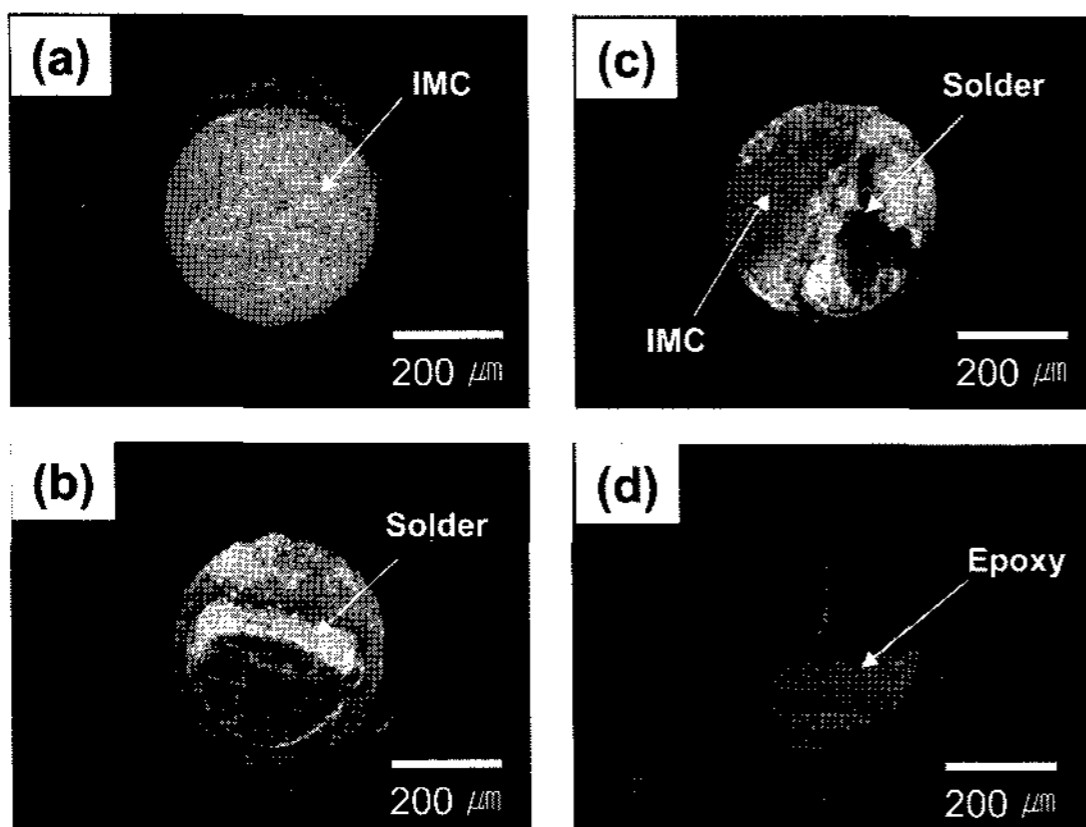


Fig. 6. The optical microscope images of fracture interface after ball shear test; (a) brittle, (b) ductile, (c) mixed and (d) pad lift.

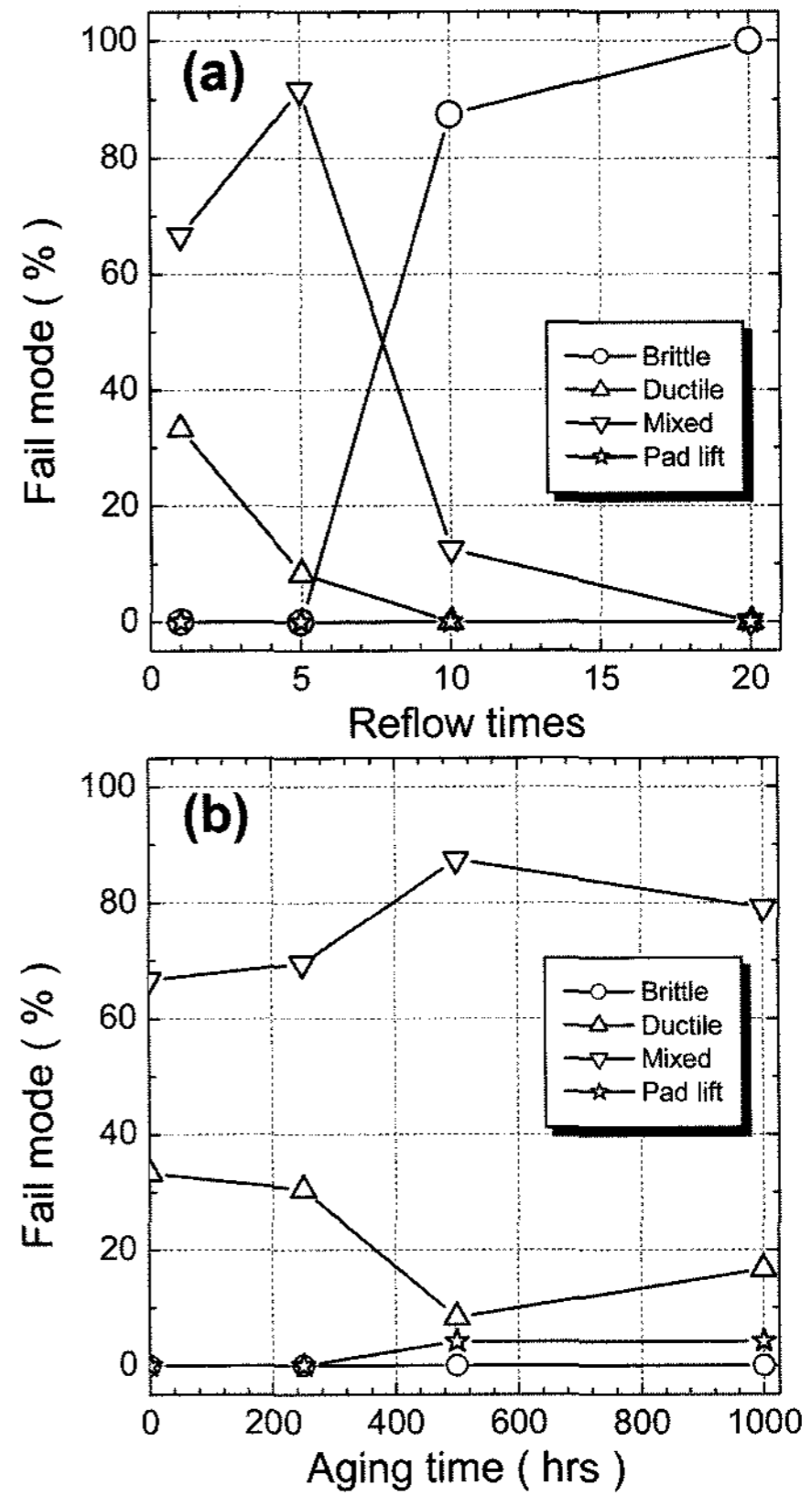


Fig. 7. The portion of solder joint crack mode after ball shear test with variation of (a) reflow times and (b) aging time.

1 m/sec의 경우는 Fig. 7과 같이 파괴모드를 비교하였을 경우, 리플로우 횟수 증가시에 취성파괴가 급격히 증가함을 확인하였다. 결국, 전단시험 속도가 낮은 경우는 솔더내에서 파괴가 이루어지기 때문에 솔더의 특성에 의해서 전단응력값이 결정되는 반면에 전단시험 속도가 빠른 경우에는 솔더와 UBM과의 반응생성물인 금속간화합물에서 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 앞의 계면반응 분석에서 확인한 바와 같이 리플로우 시에는 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 와 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 사이의 void가 관찰되었으며, 이와 같은 현상은 전단시험 속도가 낮은 경우보다는 전단속도가 빨라졌을 때 접합부 신뢰성에 영향을 주는 것으로 확인 되어 제품 낙하 등의 순간적인 충격에 있어서는 신뢰성 문제가 발생할 가능성이 있다.

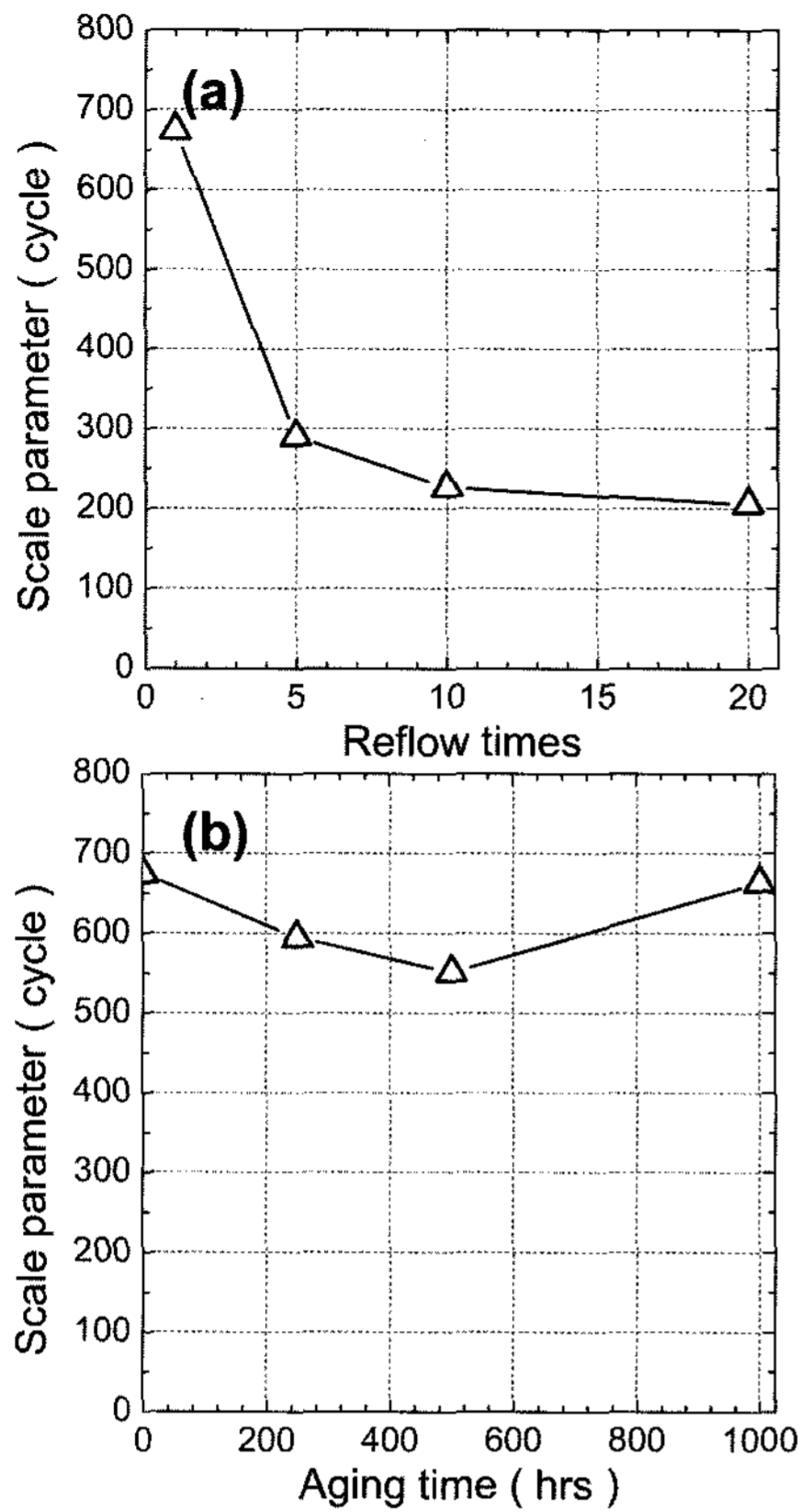


Fig. 8. The scale parameter after 3-point bending test with variation of (a) reflow times and (b) aging time.

3.3. 3점 굽힘 시험

각 조건별로 처리된 컴포넌트를 메모리 모듈 PCB에 실장한 후, 보드 레벨에서의 기계적 신뢰성을 확인하기 위해 MTS사의 만능시험기를 이용하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다. 3점 굽힘 시험은 메모리 모듈 사용자가 메모리 모듈 PCB에 변형을 여러 번 가하여 피로 현상으로 인한 솔더 접합부가 파괴되는 것을 정량화한 방법으로 IPC/JEDEC에서 규정하고 있다.³⁾ 각 조건별로 처리된 컴포넌트가 실장된 보드를 7개씩 sampling하여 3점 굽힘 시험 후에 전기적으로 fail이 발생되었을 때의 수명을 와이블 통계를 사용하여 대표수명값 (Scale parameter)을 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 리플로우 횟수를 변화시킨 컴포넌트를 실장한 보드의 굽힘 신뢰성은 리플로우 횟수가 5회인 컴포넌트를 실장한 보드에서 1회 대비 50%이상 수명 감소가 나타났으며, 10

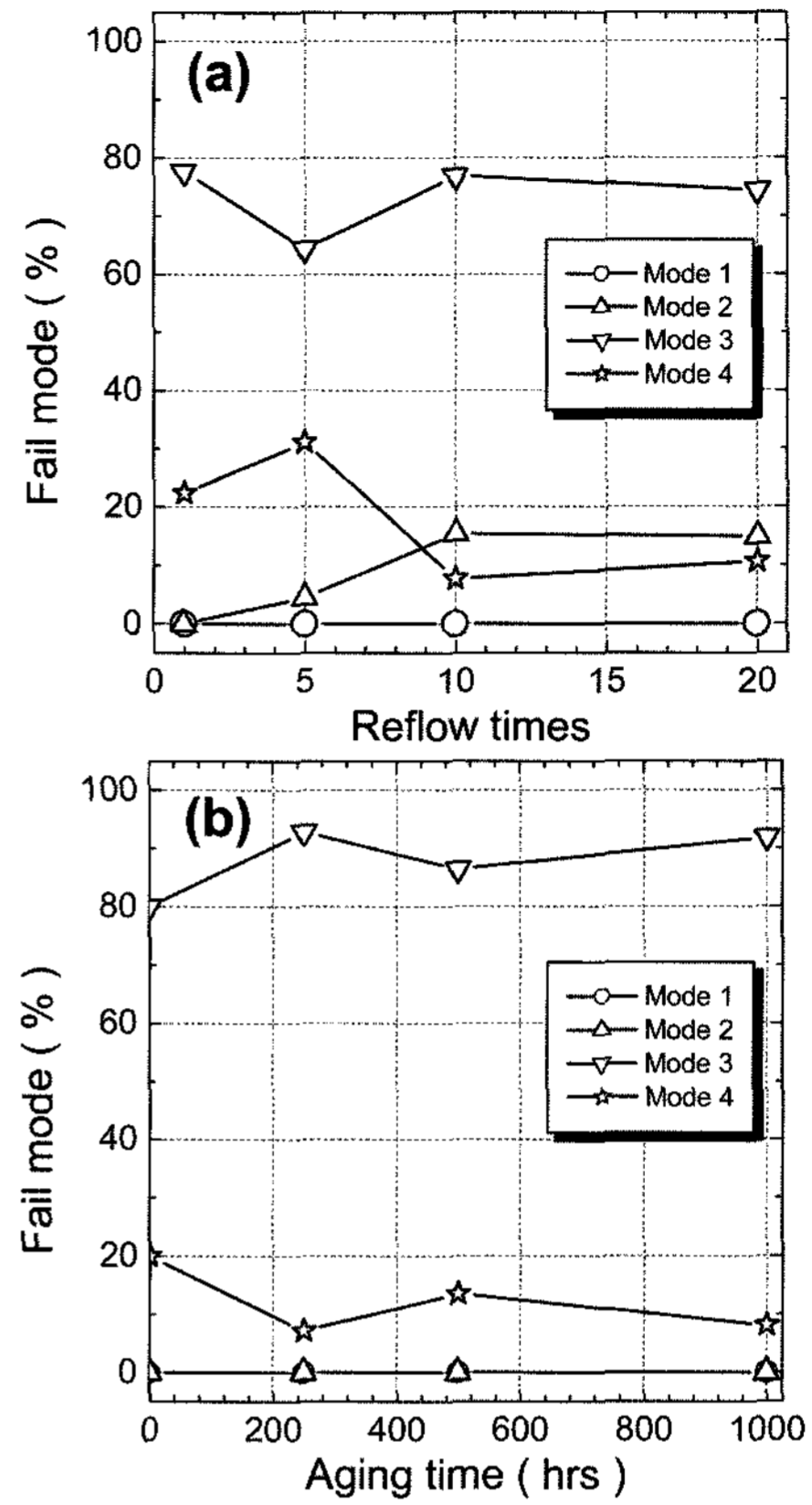


Fig. 9. The portion of solder joint crack mode after 3-point bending test with variation of (a) reflow times and (b) aging time.

회이상 리플로우를 진행한 컴포넌트를 실장한 보드에서는 감소폭이 크지는 않았다. 반면, 고온시효의 경우는 시간에 따라 유의차가 발생하지 않았다.

파괴가 발생한 컴포넌트의 파괴모드를 Fig. 1(b)에서 규정한 것과 같이 모드별로 구분하여 Fig. 9에 나타내었다. 리플로우 횟수가 증가된 컴포넌트를 실장한 보드를 굽힘 시험 후 파괴모드 분석한 결과, 모드 2, 즉 컴포넌트 쪽의 금속간화합물 내에서 파괴가 발생된 경향이 증가하였으며, 이와 같은 크랙 모드가 보드신뢰성 수명 감소에 크게 영향을 주는 것으로 판단된다. 또한, 파괴모드를 SEM 및 EDS 관찰시 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 와 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 사이에서 파괴가 발생되었음을 확인하였고, 계면분석결과 나타난 void가 두 금속간화합물에서의 크랙 전파를 더욱 빠르게 하여 보드 기계적 신뢰성에 안 좋은 영향을 주었다고 판단할 수 있다. 이와

더불어, 컴포넌트 쪽의 UBM의 형태가 SMD(Solder mask define), PCB 쪽은 NSMD(Non-Solder mask define)이기 때문에 크랙이 발생되면 금속간 화합물내의크랙전파가 SMD 형태의 컴포넌트 UBM이 불리할 것으로 예상된다.

3.4. 충격 시험

메모리 모듈에서는 컴포넌트가 외부로 노출되어 있어 작업자 및 사용자 작업시 소켓, 케이스 등 외부 물체에 부딪칠 수 있는 가능성이 있으며, 현재까지 이에 대한 정량적인 시험 방법은 없다. 따라서 본 연구에서는 10 g의 강체구를 이용하여 높이 에 따라서 자유낙하 시킨 후, 솔더 접합부 크랙 발생 모드를 Dye & Pry 법으로 확인하였다.

Fig. 10에서의 충격시험 결과, 리플로우 횟수를 정상적으로 1회만 실시한 경우는 파괴모드가 혼재하였으나, 리플로우 횟수를 증가시킨 컴포넌트

를 실장한 PCB 보드에서 파괴모드가 컴포넌트 쪽의 금속간화합물에서의 파괴(모드 2 크랙)이 발생되었다. 이와 같은 결과는 계면반응 분석결과시에 관찰하였던 컴포넌트 리플로우 횟수 증가시 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 와 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 사이에서 발생된 void가 영향을 준 것으로 사료된다. 반면, 고온시효를 진행한 컴포넌트를 실장한 시료에서는 경향성을 찾기 어려웠다.

결국, 과도한 리플로우 공정이 진행된 컴포넌트의 경우 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 와 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 금속간화합물 사이에서의 void 생성이 될 수 있으며, 이와 같이 컴포넌트가 실장된 보드에서 컴포넌트가 직접적인 외부 충격으로 인해 서론에서 서술하였던 “무연솔더에서의 컴포넌트 내에 솔더 접합면들이 동일한 모드 2 파괴로 솔더 조인트 크랙”을 유발할 수 있음을 재현하였다.

4. 결 론

Sn2.5Ag0.5Cu 솔더와 Ni/Au UBM의 리플로우 횟수 및 고온시효의 시간에 따른 계면반응 연구를 실시하여, 리플로우 횟수 증가시 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 와 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 금속간화합물 사이에 void가 발생됨을 확인하였다. 이와 같이 리플로우 횟수가 증가된 컴포넌트를 볼 전단시험한 결과, 전단시험 속도를 1 m/sec로 빠르게 한 경우, 전단에너지가 급격히 감소함을 확인할 수 있어 전단시험 속도 조건에 따라 솔더 접합부 계면상태를 대변 여부를 확인할 수 있었다. 특히, 리플로우 횟수가 증가된 컴포넌트를 실장한 PCB 보드의 3점 굽힘 시험 결과, 리플로우 횟수 증가가 보드의 급격한 수명감소를 유발시켰으며, 본 연구에서 고안한 컴포넌트에 외부충격을 가하는 충격 시험법은 본 연구에서 관찰한 $(Cu,Ni)_6Sn_5$ 와 $(Ni,Cu)_3Sn_4$ 사이에서 void 영향 등의 비정상적인 솔더 접합부의 계면상태를 파악할 수 있는 주요 시험법임을 확인하였다.

참고문헌

1. M. Abtew and G. Selvaduray, “Lead-free Solders in Microelectronics”, Mater. Sci. Eng., 27, 95 (2000)
2. F. Song and S. W. R. Lee, “Investigation of IMC Thickness Effect on the Lead-free Solder Ball Attach-

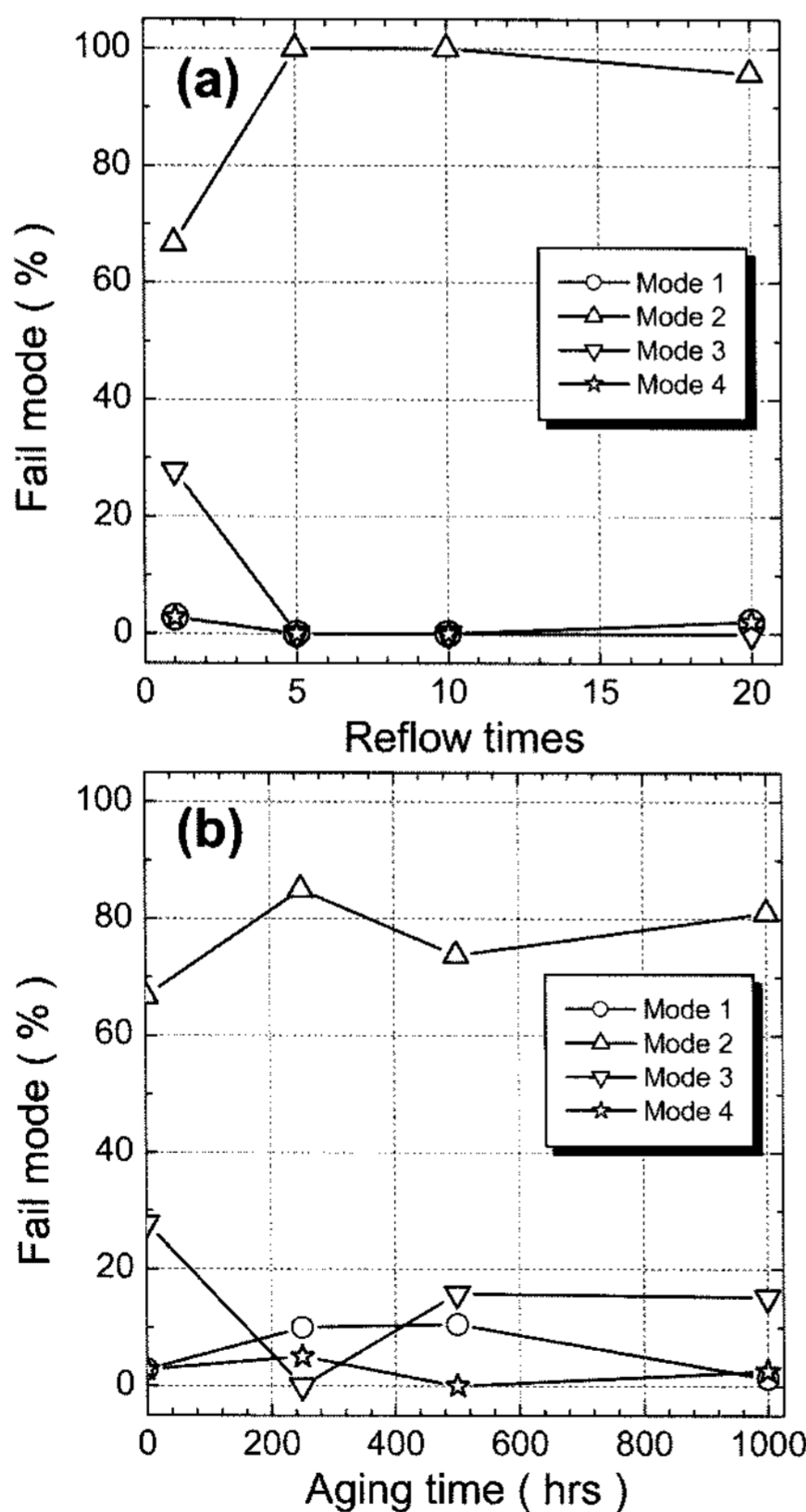


Fig. 10. The portion of solder joint crack mode after impact test with variation of (a) reflow times and (b) aging time.

- ment Strength: Comparison between Ball Shear Test and Cold Bump Pull Test Results”, Proc. 56th ECTC, 1196 (2006)
3. IPC/JEDEC-9702, “Monotonic Bend Characterization of Board-Level Interconnects” (2004)
 4. JESD22-B104-B, “Mechanical Shock” (2001)
 5. M. E. Johnson, H. Y. Lu, D. Lawhead, T. Tessier, D. Scott, and A. Curtis, “Using High Speed Shear and Cold Ball Pull to Characterize Lead Free Solder Alloys and Predict Board Level Drop Test Performance”, Proc. 57th ECTC, 536 (2007)
 6. W. C. Luo and C. R. Kao, “Liquid/Solid and Solid/Solid Reactions between SnAgCu Lead-Free Solders and Ni Surface Finish”, Proc. 4th EMAP, 330 (2002)
 7. T. Laurila, V. Vuorinen, and J.K. Kivilahti, “Interfacial reactions between lead-free solders and common base materials”, Mater. Sci. Eng., R49, 1 (2005)
 8. R. Erich, R. J. Coyle, G. M. Wenger, and A. Primavera, “Shear Testing and Failure Mode Analysis for Evaluation of BGA Ball Attachment”, Proc. 24th IEEE/CPMT, 16 (1999)
 9. J. H. Choi and T. S. Oh, “Comparison of Shear Strength and Shear Energy for 48Sn-52In Solder Bumps with Variation of Reflow Conditions”, J. Microelectron. Packag. Soc., 12(4), 351 (2005)