

ESPI와 유한요소해석을 이용한 플립칩 솔더볼의 유동특성 평가

Flow Properties Evaluation of flip-chip solder using ESPI and FEA

이백우*, 정중현*, 김주영*, 나재웅**, 백경욱**, 권동일*

*서울대학교 재료공학부

**한국과학기술원 재료공학과

1. 서 론

패키지의 접속부(interconnect)와 구조물의 지지를 위해 사용되는 솔더(볼)는 사용 중 열하중에 의한 열변형과, 높은 homologous 온도로 인해 크립 변형을 겪는다. 따라서 솔더볼의 신뢰성 평가는 패키지 전체의 신뢰성을 좌우하는 중요한 인자가 된다. 이러한 솔더볼의 신뢰성 평가를 위한 시험들은 솔더볼의 크기가 매우 작아서 기존 매크로 크기의 시편을 대상으로 하는 시험장치로는 시험하기가 어려울 뿐만 아니라 열사이클이나, 크립과 같은 시험을 하기에는 많은 시간과 비용을 요구한다. 이에, 솔더볼을 포함한 패키지의 신뢰성 평가에는 특히 유한요소해석(finite Element Analysis)과 같은 계산분석의 연구가 솔더볼의 신뢰성 평가에 많이 이용되어 왔다. 이러한 계산 분석의 연구들은 모델의 기하학적 정보, 변형모델(또는 구성방정식), 재료물성 값을 이용하여 외부 하중조건에 대한 변형을 예측한다. 유한요소해석을 하기 위해 요구되는 세 개의 입력 정보 중 기하학적인자는 실 측정에 의해 쉽게 결정될 수 있으며, 변형 모델은 이미 잘 확립되어 있다. 그러나, 재료물성 값들은 실제로 측정하기가 어려워서 대부분의 유한요소해석에서는 벌크재료의 실험치인 문헌값들은 인용하여 사용하고 있다. 이러한 문헌값을 이용한 유한요소해석은 신뢰성 평가를 오히려 신뢰적이지 못하게 할 수도 있다. 왜냐하면, 솔더와 같은 재료는 제조하는 공정과 사용이력에 따라 상이한 물성치를 나타내고, 또한 이러한 문헌 값들은 동일한 솔더의 재료라 하더라도 다른 물성값을 보고하고 있기 때문이다. 그리고, 솔더와 같은 재료의 물성 평가법에 대해서는 표준시험법의 절차가 확립되어 있지 않으며, 최근에는 벌크상태의 재료와 in-situ일 때 다른 물성을 나타낸다는 보고도 있기 때문에 정확한 재료물성의 정보는 더욱 더 중요해진다[1-2]. 본 연구에서는 재료물성과 모델 정보로부터 변형을 평가하는 기존의 유한요소해석과는 역으로 ESPI에 의해 측정된 열변형값을 기초로하여 재료물성값을 평가하고자 한다.

2. 실험방법

벌크 구조물의 변형량 평가에 주로 이용되어 온 ESPI 시스템을 플립칩 열변형 평가에 적용할 수 있도록 분해능을 향상시켰다. 벌크재료에 적용된 ESPI 시스템을 구축한 후 배율 확대를 위해 두개의 렌즈를 그림 1과 같이 부착하였다. 렌즈 1은 초점거리가 33.5mm이고 배율이 $\times 10$ 인 고배율 원거리 렌즈이고, 렌즈 2는 조리개가 내장된 최대배율 $\times 2$ 의 줌 렌즈이다. 렌즈 1과 2는 일렬로 배열되어 상호간의 위치를 조절함으로써 상의 크기를 확대 또는 축소시킬 수 있다. 이 때 줌 렌즈는 미세한 초점을 조절하는 기능을 한다. 두 렌즈의 상호 위치관계는 렌즈와 CCD 카메라의 초점거리 허용치 안에서 조절이 가능하고, 이러한 배율 확대를 통하여 최대 20배 확대된 대상 이미지를 평가할 수 있다.

플립칩 시편은 실리콘 칩과 솔더볼, FR-4 기판으로 구성되어 있다. UBM(Under Bump Metallurgy)층으로 Cu $2\mu\text{m}$, Ni $3\mu\text{m}$, Au $0.1\mu\text{m}$ 를 무전해 도금법을 통해 형성시켰다. 솔더 범프는 Sn-36Pb-2Ag의 조성을 가지는 지금 $500\mu\text{m}$ 의 볼을 사용하였다. 리플로(reflow) 공정은 최고온도 $240\pm 5^\circ\text{C}$, 녹는점 이상에서의 지속시간(dwelling time)은 80 ± 5 초, 초기 가열 속도는 $1.5\sim 2.5^\circ\text{C}/\text{sec}$ 로 행하였다.

회로에 흐르는 전류에 의한 시편의 열변형 상황을 모사하기 위하여 광학창이 달린 진공 열챔버를 제작하여 사용하였다. 챔버의 외부에서 ESPI 시스템을 사용하여 가열 상황에 따른 시편의 변형량을 실시간적으로 측정하기 위하여 챔버 앞부분에 레이저가 통과할 수 있는 광학창을 설치하였다. 25℃~125℃까지 승온속도 2.5℃/min로 플립칩 시편을 가열하면서 5℃ 간격으로 배율이 확대된 ESPI 시스템을 이용하여 변형량을 측정하였다. 플립칩의 단면 열변형을 관찰하기 위하여 ESPI 시스템의 광학계는 면내 변위 측정용으로 구성하였다. 플립칩이 좌우 대칭으로 구성되어 있기 때문에 중심에서 오른쪽 1/2부분에 대하여 수평방향의 변위를 측정하였다. 측정된 프린지는 위상천이법(Phase shifting method)을 통해 위상도(Phase map)로 변환되어 정량적인 변형량을 평가 하였다.

3. ESPI 측정결과

분해능이 향상된 ESPI 시스템을 이용하여 온도 상승 시에 플립칩 시편의 변형 프린지 패턴을 그림 2와 같이 얻었다. 프린지 개수의 변화로부터 온도가 상승함에 따라 실리콘 칩과 FR-4 기판사이의 열팽창계수 차이에 의한 변형이 커짐을 확인 할 수 있다. 이러한 프린지 패턴의 위상도로부터 이미지 프로세싱 과정을 통해 그림 3과 같이 플립칩 각 부분의 변위 전체를 정량적으로 평가하였다. 그림 4는 플립칩의 전체 15개 솔더 볼 중 가장 중앙에서 바깥쪽 8번째 솔더볼에 대해 변형된 변위를 보여준다. 측정은 실리콘 칩과 FR-4 기판과 솔더볼이 접하는 곳의 솔더볼 중앙에서 이루어 졌으며, 실험횟수는 5회였고, 나타낸 값들은 이들의 평균값이다. 솔더볼의 구속에 의해 실리콘 칩의 변형 양상은 선형성에서 벗어나 위로 볼록한 변형을 나타내고, FR-4 기판은 아래로 볼록한 변형 양상을 보여준다. 플립칩 솔더볼의 실리콘 칩쪽에는 인장응력, FR-4 기판 쪽에는 압축응력이 작용하게 되는데, 플립칩의 중심일수록 솔더볼에 의한 인장과 압축에 의한 구속이 커지고 바깥쪽으로 갈수록 약해져서 이러한 변형 양상을 나타낸다.

4. 유한요소해석을 이용한 유동특성 평가

플립칩에 대한 ESPI의 변위 측정결과 정보를 이용하여 유동특성 평가를 하기 위해서 유한요소해석을 실시하였다.

4.1 유한요소해석

플립칩 패키지에서 발생하는 열변형 평가를 위한 유한요소해석을 수행하였다. 평가 대상 플립칩은 ESPI의 실험에 사용한 것과 동일하다. 모델의 대칭성을 고려하여 전체 모델의 1/4을 3차원으로 그림 5와 같이 모델링하였다. 실리콘 칩과 기판인 FR-4는 탄성변형만을, 솔더볼은 탄소성 변형을 가정하였다. 8절점 요소를 사용하였으며, 4920개의 요소(elements)와 6910개의 절점(node)으로 구성되었다. 유한요소해석은 ABAQUS[3]를 사용하였다.

4.2 유동특성평가 방법

ESPI의 측정결과에서도 알 수 있듯이, 플립칩 솔더볼의 변형은 중심 솔더볼에서 바깥쪽으로 가면서 커진다. 이는, 플립칩 솔더볼의 중앙에서 바깥쪽으로 갈수록 솔더볼에 가해지는 응력이 커져 변형 또한 커지기 때문이다. 그림 6과 같이 한 개의 플립칩 시편에 8개의 응력-변형 상태가 존재함을 (플립칩 시편은 좌우 대칭) 알 수 있다. 이러한 8개의 응력상태를 유한요소해석에 의한 변형결과와 ESPI에 의한 변형 측정결과가 같을 때에 일축인장응력 상태에서의 응력-변형 곡선에 대응시킴으로써 유동곡선을 결정할 수 있다.

일축인장 곡선을 구간별로 선형이라고 가정하고, 그림 6에서 플립칩 시편의 응력-변형 상태인 (σ_x , ϵ_x)를 일축인장 응력-변형곡선에 대응시킨다. ESPI의 측정결과와 동일한 변위를 유발하는 일축인장 응력-변형 곡선은 그림 7 (a)에서 보는 것과 같이 다양한 조합의 항복강도(y축 절편에 해당, Y)와 가

공경화(직선의 기울기에 해당, H)에 의해 무한한 수의 곡선이 존재한다. 이 중 2개의 곡선을 임의로 선택하여 살펴보자. 이 둘 두 곡선에 대해서 공통적으로 플립칩과 실리콘 칩의 열팽창계수 차이에 의해 솔더에 가해지는 응력은 동일해야 한다는 조건은 항상 만족하여야 한다. 따라서, 플립칩의 변형을 유발하게 한 일축인장 응력 상태에서의 응력-변형 상태는 이들 곡선들이 만나는 지점을 반드시 통과하여야 한다. 또한 선택된 이 2개의 곡선 이외에 다른 곡선들도 이 지점을 지나야 한다. 왜냐하면, 이들 두 곡선이 만나는 지점을 통과하지 않으면, 가해지는 응력과 변형이 같지 않기 때문이다. 이와 같이 8개의 응력-변형 상태를 연속적으로 일축인장 응력-변형 곡선에 대응시킴으로서 그림 7(b)와 같이 유동곡선을 평가할 수 있게 된다.

5. 결 론

배울 확대를 위한 광학시스템이 부착된 ESPI 장치를 이용하여 열하중 인가시에 플립칩의 미소변위를 sub-micron 단위로 측정하였으며, 미소변위의 정보로부터 유한요소해석을 통해 재료물성을 구하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 이로부터, 일축인장시험이 행하기 어려운 솔더볼에 대한 인장 응력-변형 곡선을 얻을 수 있었다. 또한 패키지를 구성하는 다양한 재료물성의 값들이 전체 시스템의 변형에 미치는 효과를 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Shi-Wei Ricky Lee and Xiaowu Zhang : Sensitivity study on material properties for the fatigue life prediction of solder joints under cyclic thermal loading, Circuit World, 24-3(1998), pp.26-31
2. S. Wiese, B. Michel and et al. : Constitutive behavior of Lead-free Solders vs. Lead-containing Solders-Experiments on Bulk Specimens and Flip-Chip joints, 2001 Electronic Components and Technology Conference, IEEE.
3. Habbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., ABAQUS/Standard.

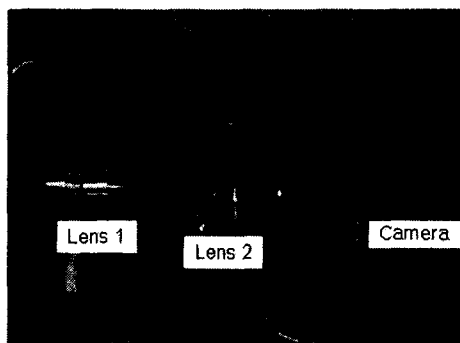


Fig. 1 Optical magnifying system attached to ESPI for the measurement of micro-displacement.

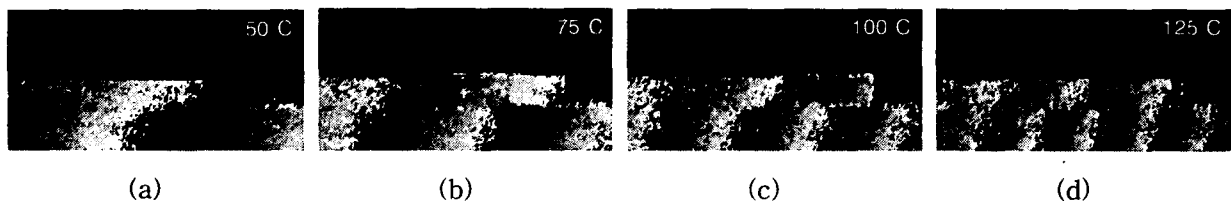


Fig. 2 Phase maps obtained by ESPI at 50°C, 75°C, 100°C and 125°C

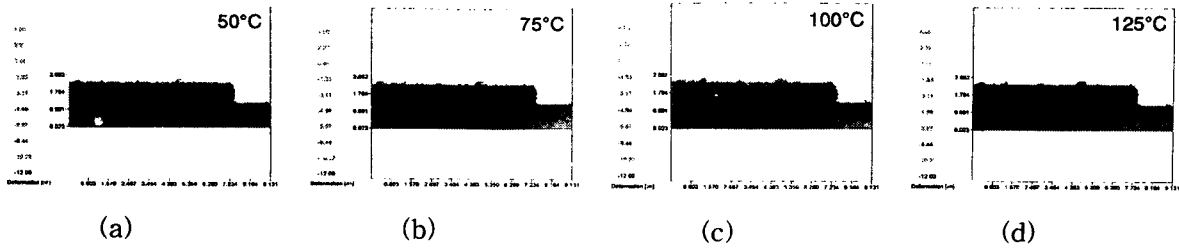


Fig. 3 Horizontal deformation images at 50°C, 75°C, 100°C and 125°C

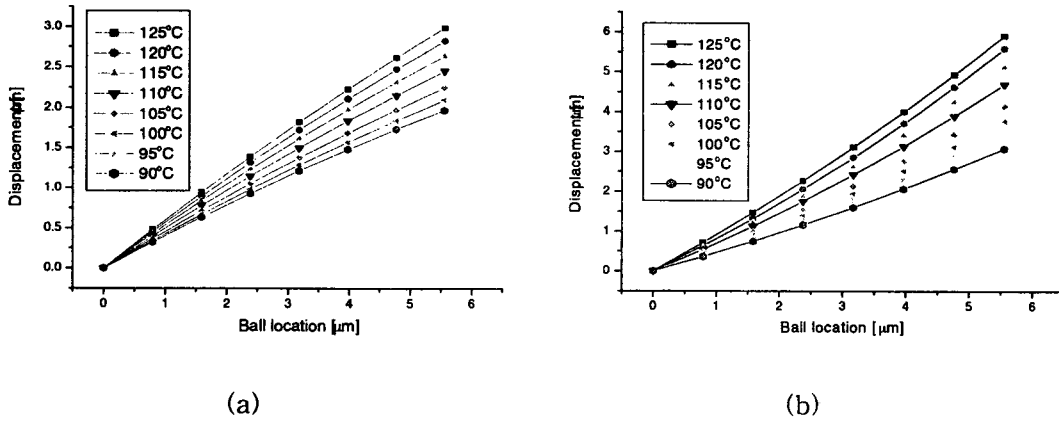


Fig. 4 Horizontal displacement measured by ESPI system during thermal loading at (a) Si chip side and (b) FR-4 side.

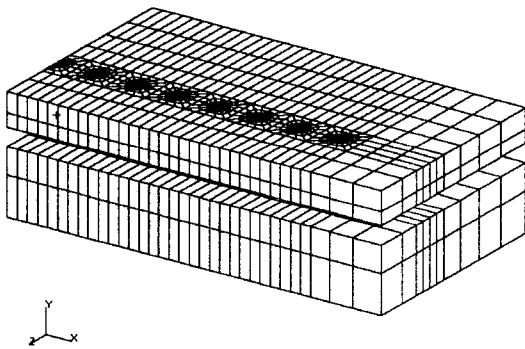


Fig. 5 Finite element analysis of quarter of the assembly

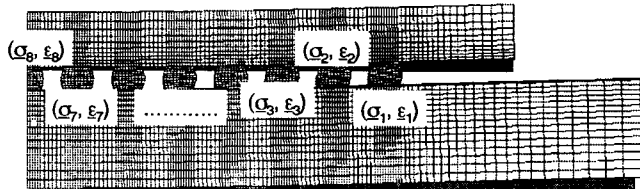


Fig. 6 The existence of eight stress-state in a flip chip specimen: $(\sigma_8, \epsilon_8) < (\sigma_7, \epsilon_7) < (\sigma_6, \epsilon_6) < \dots < (\sigma_2, \epsilon_2) < (\sigma_1, \epsilon_1)$.

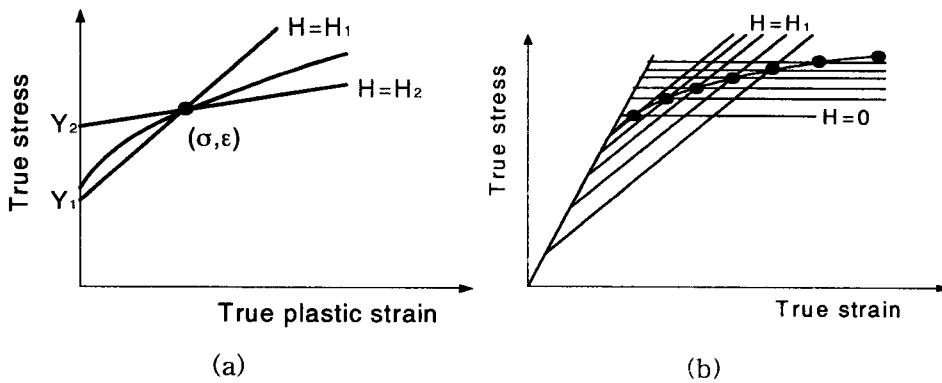


Fig. 7 Schematic diagram showing the procedures for the determination of uniaxial stress-strain curve: (a) stress-strain point and (b) continuous determination.