

μBGA 솔더 접합부의 최적 형상 예측에 관한 연구

신영의 · 지시현 · 후지모토 고조* · 김종민*

중앙대학교 기계공학부, *오사카대학교 기계공학대학원

A Study on the Optimal Shape Prediction of μBGA Solder Joints

Young-Eui Shin, Si-Heon Ji, Kozo Fujimoto* and Jong-Min Kim*

Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Chung Ang, Seoul, 156-756, Korea

*Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

초 록: 본 연구에서는 솔더 접합부의 최적 형상을 예측하는 몇 가지 방법에 대하여 연구하였다. 솔더 접합부 형상 예측법에는 Truncated Sphere법, 힘-평형 해석법(force-balanced analytical method), Ken Brakke에 의해 개발된 Surface Evolver등이 있다. 이상의 형상 예측법 중 본 연구에서는 Truncated Sphere 법과 SurfaceEvolver를 사용하여 μBGA의 솔더 접합부의 형상을 예측하고, 결과를 비교하였다. 그 결과 Truncated Sphere법과 SurfaceEvolver가 제시하는 두 가지의 형상은 아주 작은 오차를 두고 거의 일치함을 확인하였다. 또한, 형상 예측법이 제시한 형상의 신뢰성을 검증하기 위하여, FEA 프로그램인 ANSYS(version5.62)를 이용하여 대상 형상에 열 사이클 시험을 실시하였다. 해석 결과, 형상 예측법이 제시한 형상이 임의의 오차를 가한 다른 형상에 비하여 가장 좋은 신뢰성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

Abstract: In this paper, several methods to predict the solder joint shape are studied. Although there are various methods to predict the solder joint shape, such as truncated sphere method, force-balanced analytical solution, and energy-based methods like surface evolver developed by Ken Brakke, we calculate solder joint shape of μBGA by two solder joint shape prediction methods(truncated sphere method and surfaceevolver) and then compare results of each method. The results indicate that two methods can accurately predict the solder joint shape in an accurate range. After that, we calculate reliability solder joint shape under thermal cycle test by FEA program ANSYS(version5.62). As a result, it could be found that optimal solder joint shape calculated by solder joint prediction method has best reliability in thermal cycle test.

Key Words: Solder joint shape, Reliability, Thermal fatigue, FEA, μBGA, Surface evolver

1. 서 론

반도체 응용분야가 급속도로 확대되면서 다양한 요구 사양 대응에 필요한 반도체 패키지 또한 급증하고 있다. 최근 이러한 요구 사양에 따라 반도체 패키지 부분에서 BGA, CSP 및 Flip Chip 패키지가 보편적으로 사용되고 있다. 이들 다양한 타입의 패키지 중 수년간에 걸쳐 3~4개 패키지만이 아주 특수한 상황에서 사용되어 왔으나, 첨단 패키지 시장의 핵심 요소로 여전히 인식되고 있다¹⁾. 이들 패키지들은 고밀도 실장이 가능하다는 점 이외에도 각각의 패키지 구조도 고속 응답성이나 낮은

임피던스 등 양호한 전기적 특성을 가지고 있는 점에서도 앞으로 더욱 보급이 확산될 것으로 전망되고 있다.

그러나, 이들 제품의 솔더링후 제품 검사를 위해서는 정밀 X-Ray장비가 필요하고, 솔더링 불량 발생 경우 수리하는 어려움과 시간이 많이 소요되는 단점도 있다. 따라서, BGA나 CSP를 생산할 경우는 일반 QFP나 SOP에 비해 기술적으로나 관리적인 측면에서 상당한 주의를 가지고 엄격한 관리를 해야 한다²⁾. 또한, 고밀도 실장기술이 발전함에 따라 표면 실장 공정에 따른 조립 생산량과 솔더 접합부의 신뢰성에 대한 관심이 더욱 커지게 되었다. 부품의 크기가 작아지고, 인터커넥션과 패키

지가 물리적·열적 스트레스에 민감해짐으로써, 최선의 기술을 선택하여 지속적이고 신뢰할만한 생산 결과를 창출하는 것은 점점 어려워져만 가고 있다³⁾.

솔더 접합부의 신뢰성은 솔더 재료의 성질과 더불어 솔더 접합부의 형상에 높은 의존도를 가지고 있다고 보고되고 있고, 많은 연구자들 사이에 솔더 리플로우 형상을 예측하는 것이 중요한 문제로 대두될 만큼 솔더 접합부의 형상은 제품의 신뢰성을 크게 좌우할 수 있다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 CSP 계열의 패키지인 μ BGA를 사용하여 접합부의 신뢰성을 연구하였다. μ BGA 또한 솔더 접합부의 형상이 패키지 자체의 신뢰성에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 보고되어지고 있고, 가장 신뢰성이 좋은 형상을 제시하는 방법을 찾아내기 위해 많은 연구자들이 노력을 하고 있다. 솔더 리플로우 형상을 예측하는 방법에는 Truncated Sphere법, 힘-평형 해석법(force-balanced analytical method), 에너지법(energy-based algorithm) 등이 있는데, 이상의 방법이 솔더 접합부의 형상을 예측하는 주된 방법들이다⁴⁾. 본 연구에서는 Truncated Sphere법과 에너지법을 기본으로 제작된 FEA 프로그램인 Surface Evolver를 사용하여 솔더 접합부의 형상을 예측하고, 그 결과를 비교하였다.

또한, 예측된 형상을 모델링하여 FEA 프로그램인 ANSYS(Version 5.62)를 사용하여 가장 적은 변형량을 나타내는 최적의 솔더 접합부의 형상을 찾아내었고, 형상 예측법의 타당성을 입증하였다.

2. 실험 대상 및 방법

2.1. μ BGA 패키지

실험에 사용된 μ BGA 패키지는 CSP의 일종으로 패키지의 크기는 칩 크기의 약 1.2배인 6.3×6.2 mm이며, 0.35 mm 볼을 사용하였다. 볼 피치는 0.75 mm이며, 칩과 폴리이미드 필름 사이에는 응력완화재인 일라스트머를 사용하였다. 그리고, 사용한 볼의 재질은 Sn-37Pb이며, I/O는 48개인 패키지이다.

2.2. 솔더 접합부의 형상 예측법

솔더 접합부의 형상은 솔더의 상부에서 가해지는 압력, 패키지 패드의 형상, PCB 패드의 형상, 솔더의 부피, 표면장력, 솔더의 밀도 등 많은 요소에 의해 결정되어진다. 최근 연구에 따르면 솔더 접합부는 패키지의 피로수명에 지대한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다⁵⁾. 그래서, 많은 연구자들이 최적의 솔더 접합부 형상을 예측해 낼 수 있는 방법을 연구하고 있다. 현재까지 연구되어진 솔더 접합부의 형상 예측법에는 여러 가지가 있지

만, 그 중 Truncated Sphere법, 힘-평형 해석법, 에너지법이 형상 예측법 가운데 가장 많이 사용되는 방법들이다. 본 연구에서는 Truncated Sphere법과 에너지법 중 최소 에너지 법칙을 바탕으로 제작된 FEA 프로그램인 Surface Evolver를 사용하여 솔더 접합부의 최적 형상을 예측하였다.

2.2.1. Truncated Sphere법

Truncated Sphere법은 어떤 힘이나 에너지요소를 고려하지 않고, 형상만을 고려한 알고리즘이다. 이 방법은 경량 패키지인 경우 비교적 정확한 범위 내에서 접합부의 높이와 최대 접합부 폭을 구할 수 있다. 패키지를 PCB(printed circuit board)에 실장할 경우, 패키지 기판과 PCB 사이의 솔더 접합부는 “Double Truncated Sphere” 형상을 나타내게 된다. “Double Truncated Sphere” 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

이 경우 범프의 높이 h 와 솔더 지름 D 는 솔더의 부피(V)가 변함에 따라 달라지게 된다. 결과적으로, 솔더의 부피를 알고 있다면, Fig. 1에 나타난 솔더 접합부의 높이와 솔더 볼의 지름을 식(1)~식(3)을 통해 계산해 낼 수 있다⁴⁾.

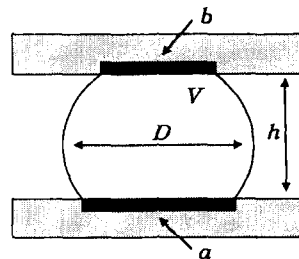
$$h = \sqrt{R^2 - a^2} + \sqrt{R^2 - b^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{\sqrt{h^4 + 2 \cdot h^2 \cdot (a^2 + b^2) + (a+b)^2 \cdot (a-b)^2}}{2 \cdot h} \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot [\sqrt{R^2 - b^2} \cdot (2R^2 + b^2) + \sqrt{R^2 - a^2} \cdot$$

$$(2R^2 + a^2)]$$

$$V = \frac{\pi}{12h^3} \cdot [A(A^2 + 6a^2 \cdot h^2) + B \cdot (B^2 + 6b^2 \cdot h^2)]$$



D : Solder joint diameter

V : Solder volume

h : Solder joint height

a : Lower pad radius

b : Upper pad radius

Fig. 1. Solder ball cross section on the board.

$$A = \sqrt{h^4 + (a^2 + b^2)^2 + 2 \cdot (b^2 - a^2) \cdot h^2}$$

$$B = \sqrt{h^4 + (a^2 + b^2)^2 + 2 \cdot (b^2 - a^2) \cdot h^2} \quad (3)$$

만약, $a = b$ 인 조건이면, 솔더 부피식은 식(4)와 같이 간단하게 정리된다.

$$V = \frac{\pi \cdot h}{6} \cdot [h^2 + 3 \cdot (a^2 + b^2)] \quad (4)$$

2.2.2. Energy-Based Method

Surface Evolver와 같은 에너지법은 표면장력, 중력의 영향, 내·외부의 압력 등을 고려하는 솔더 접합부의 형상 예측법이다.

솔더 접합부는 표면장력, 중력, 내·외부의 압력이 모두 균형이 맞았을 때 평형을 이루게 된다. Surface Evolver는 삼각형의 면들이 서로 연결된 조합으로 이루어진 불연속적인 초기 표면을 구성하는 것으로 시작된다. 그런 다음 이 초기 표면을 Conjugate Gradient법에 의해 최소 에너지 배열이 되도록 반복 작업을 실시하여 접합부의 형상을 얻어내게 된다. 이러한 방법으로 3차원의 분체라도 충분히 검토할 수 있도록 제작 되어있으며, 다른 경계 조건 범위와 구속, 표면장력, 솔더의 부피, 솔더의 밀도 등과 같은 Energy Integral이 모델에 적용된다⁶⁾.

2.3. 유한요소해석

본 연구에서 형상의 신뢰성을 확보하기 위해 사용된 유한요소해석 프로그램은 Preprocess(모델링) - Solution(해석) - Postprocess(그래픽)기능을 장착한 ANSYS (Version5.62)이다. Solver는 열해석을 간단하여 JCG Solver를 사용하였다.

2.3.1. 모델링

본 연구에서는 6×8배열의 μBGA 패키지를 PCB 기

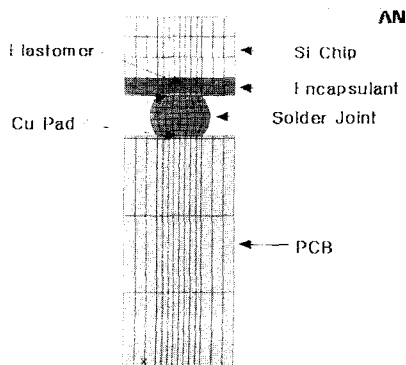


Fig. 2. Cross sectional view of FEM model.

판 위에 접합한 구조를 해석 대상으로 하였다. 해석 대상은 열해석과 구조해석을 동시에 수행하는 연성해석(coupled fields analysis)을 선택하였으므로, 시간과 해석의 용이성을 고려하여 결과에 영향을 미치지 않는 조건 하에서 단순화 작업을 하였다.

모델의 구성은 실리콘 칩, 인캡슐런트, 구리 패드, 일라스톰어, 솔더 접합부, FR-4재질의 PCB등의 총 6가지의 재질로 단순화하였다. Fig. 2는 대상 모델의 개략적인 구조를 나타내었다. 모델의 제작은 최적높이에 의해 구형된 형상과 임의의 오차를 가진 2개의 모델로 총 3개를 대상으로 유한요소해석을 실시하였고, 각 모델의 해석과정에서 결과의 차이를 배제하기 위해 모두 동일한 mesh 방식과 1,603개의 노드(node)와 1,297개의 요소(element)로 동일하게 구성하였다.

2.3.2. 재료의 물성치

유한요소해석에 사용된 각 재질의 물성치는 해석시 소요되는 시간과 실패율을 줄이고, 해석의 용이성을 위해 대상 모델을 이루고 있는 재료는 모두 등방성의 탄성재료로 가정하였다.

2.3.3. 경계조건 및 하중조건

유한요소해석시 적용시킨 경계조건은 전체 모델에서 절단된 절단면에 존재하는 $x=0$ 인 노드, $y=0$ 인 노드, $z=0$ 인 노드를 각각의 축의 방향에 대하여 고정시켰으며, 좌표축의 원점이 되는 노드는 모든 방향에 대하여 고정시켰다. 하중 조건으로는 시간에 따른 온도변화를 테이블 형식으로 가하였으며, 시간에 따라 모든 노드에 균일한 온도가 발생하도록 설정하였다. Fig. 3에 시간에 따라 모델에 가한 온도 프로파일을 나타내었다.

또한, 열 사이클로부터 솔더 접합부에 있어서 솔더의 비선형성에 따른 안정된 변형 경로 곡선을 얻고, 일시적인 뒹(transient ratcheting)현상이나, 하강(shakedown)효과를 최소화하기 위하여 완전한 2사이클을 가하였다⁷⁾.

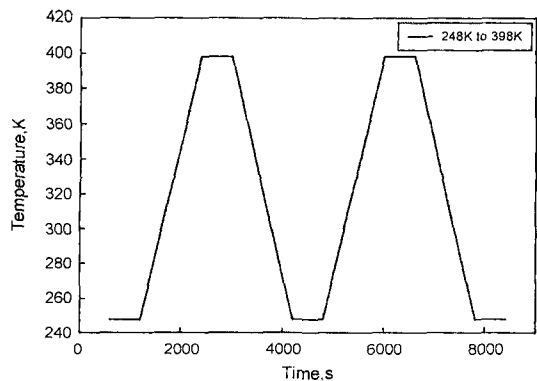


Fig. 3. Temperature profile of thermal cycle test.

3. 결과 및 고찰

3.1. 형상 예측 결과

솔더 접합부를 형상화함에 있어, 고려해야 할 사항은 솔더 볼의 크기에 따른 패키지 · PCB의 패드의 크기를 어떻게 설정하는가이다. PCB 설계함에 있어 중요한 점은 신뢰성과 제품이 요구하는 성능을 고려해서 패드 크기를 결정하는 것이다. 패드 크기의 경우 BGA, CSP 전극부 크기와 동일하게 하는 것이 장기 신뢰성에서는 가장 좋은 것으로 알려져 있다⁸⁾.

솔더 볼은 일반형(normal type)을 많이 사용하며 패드의 크기보다 75 μm에서 50 μm정도 크게 설계하는 것이 바람직하다. 솔더 접합부의 형상을 예측하는데 적용되는 부피는 PCB에 인쇄되는 페이스트(paste)의 양에 해당하는 부피를 더 가산해야한다. 본 실험에서는 0.35 mm 솔더 볼을 이용한 μBGA 패키지의 솔더 접합부 형상을 예측했다. PCB에 도포되는 페이스트의 두께는 0.12 mm, 패키지부와 PCB부의 패드크기는 동일하게 0.3 mm를 적용하였다.

$a = b$ 인 경우 식(4)를 이용하고, 부피는 V_T 를 적용한다.

$$V_T = V_B + V_P \quad (5)$$

여기서,

$$V_T \quad : \text{Total Volume}$$

$$V_B = \frac{4 \cdot \pi r^3}{3} \quad : \text{Volume of Solder Ball}$$

$$V_P = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad : \text{Volume of Solder Paste}$$

위의 식(4)를 이용해 h 를 구하면,

$$h = 0.27818 \text{ mm} \quad (6)$$

다음으로 식(2)에 구한 h 를 대입하여 솔더 접합 부의

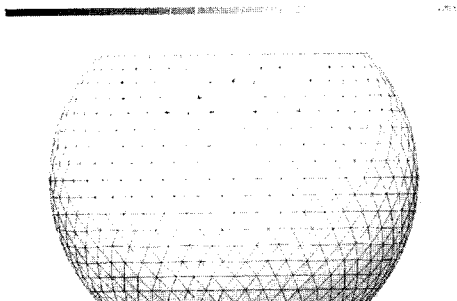


Fig. 4. Optimal solder joint shape calculated by Surface Evolver.

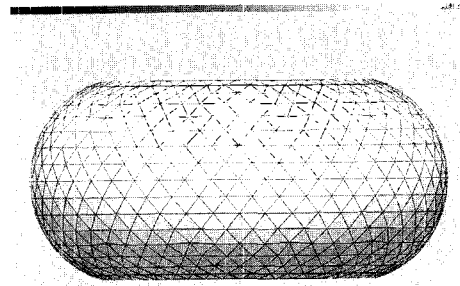


Fig. 5. Low height shape calculated by Surface Evolver.

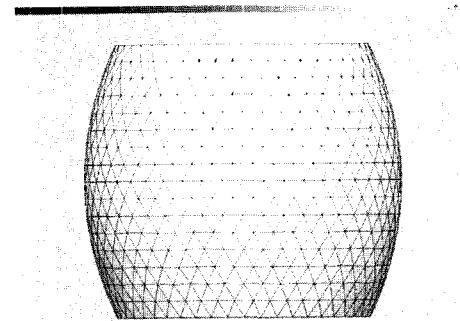


Fig. 6. High height shape calculated by Surface Evolver.

$D (= 2R)$ 를 구했다.

$$D = 0.4092 \text{ mm} \quad (7)$$

Truncated Sphere법을 이용해 구한 최적 형상의 값을 기준으로 뚜렷한 결과가 예측되는 임의의 오차(± 0.05 mm)를 주어 2개의 접합부를 더 형상화하였다. 오차값은 큰 높이고차를 갖는 형상이 볼 형상을 유지하면서, 모래시계형상(hourglass shape)을 갖지 않는 조건에서 최대한의 높이고차를 가하였다. Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6는 Truncated Sphere법의 결과를 토대로 Surface Evolver를 이용하여 구한 최적의 형상과 접합부의 높이에 임의의 오차를 가한 2개의 솔더 접합부를 나타낸 것이다.

3.2. 유한요소해석 결과

각 형상의 해석후 나타난 Von Mises응력 분포를 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다. 나타난 현상에서도 알 수 있듯이 대상 모델은 열팽창계수가 작은 실리콘 칩 부분에 비해 상대적으로 열팽창계수가 큰 인캡슐런트층에서 많은 변형을 하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 변형 경향은 결국 패키지 내부에서도 실리콘 칩과 인캡슐런트, 그리고, 솔더 내부의 다른 구성물질 즉, 구리 패드나 베

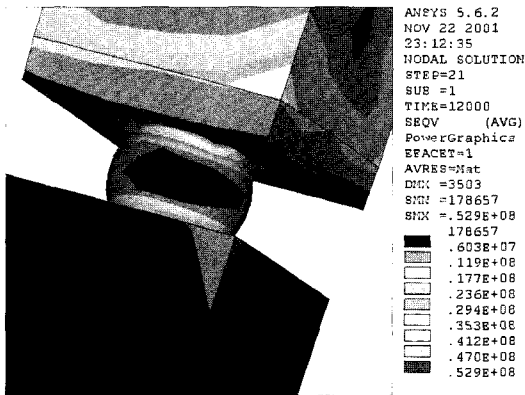


Fig. 7. Optimal solder joint shape after FEA.

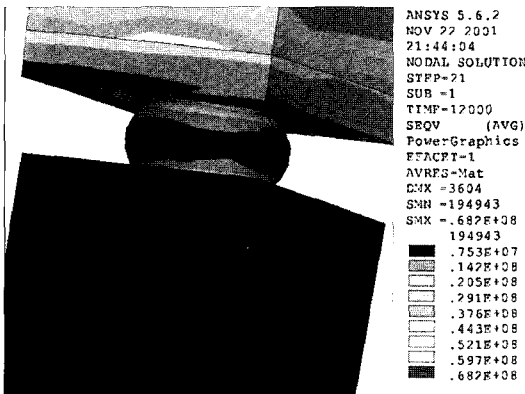


Fig. 8. Low height shape after FEA.

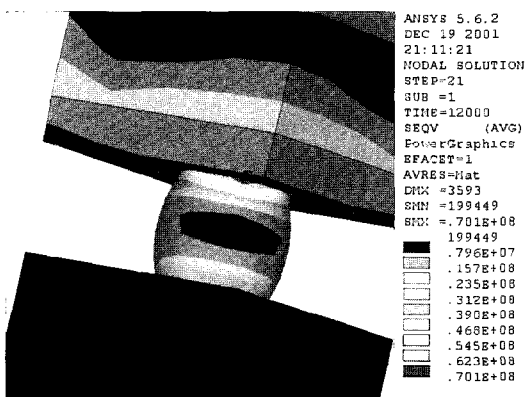


Fig. 9. High height shape after FEA.

이스 필름등의 열팽창차이로 인하여 그 계면에 응력이 집중하게 될 것임을 예상할 수 있게 해준다. 응력분포를 살펴보면 각각의 대상 모델은 인캡슐런트와 칩의 계면에서 많은 응력이 발생하였고, 솔더볼과 구리 패드 사이의 계면에서 최대 응력이 발생하였다. 이것은 각각의 대

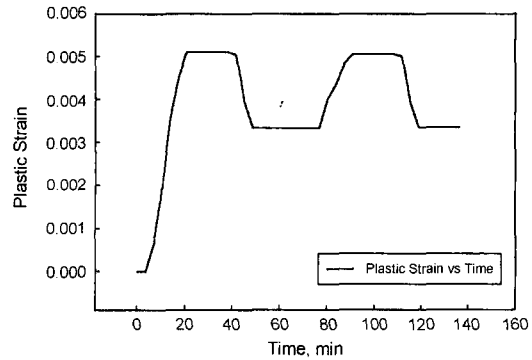


Fig. 10. Hysteresis curve of optimal shape.

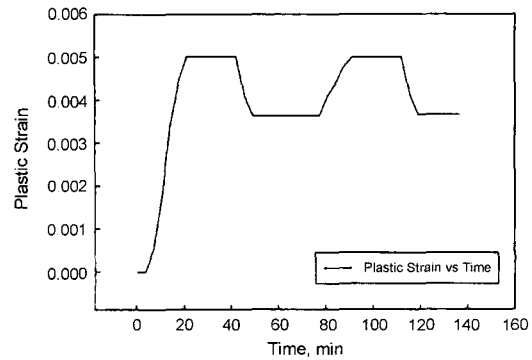


Fig. 11. Hysteresis curve of low height shape.

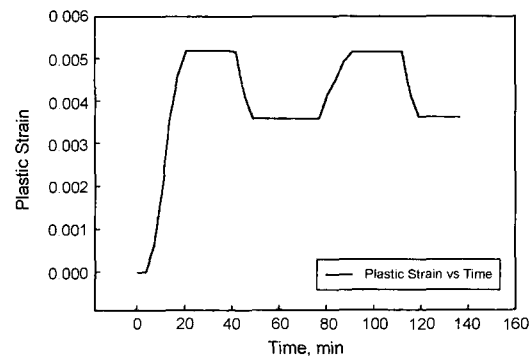


Fig. 12. Hysteresis curve of high height shape.

상 모델은 솔더볼과 구리 패드 사이의 계면에서 최초 파단이 일어날 것임을 짐작할 수 있게한다.

또한, 이러한 응력집중은 해석 대상에 열응력을 가한 결과이므로, 소성변형량의 변화와 밀접한 관계가 있다. 내부에 발생하는 소성변형은 그 구조물의 수명과도 직결된다. 소성변형의 중첩은 파단에 이르게 하는 가장 큰 요인 중 하나이다. 그래서, 해석결과를 정리하여 각 형상들의 소성변형량을 측정하고, 그 값을 이용하여 소성변

Table 1. Plastic strain amplitude of each shape

	Optimal shape	Low height shape	High height shape
ϵ_a	0.002209	0.002244	0.002286

Table 2. Fatigue constants of Sn-37Pb solder

	α	C
Sn-37Pb	0.49	0.24

Table 3. N_f of each shape

	Optimal shape	Low height shape	High height shape
N_f	14290	13835	13304

형 진폭을 구하여, 각 모델의 수명을 예측하였다. 결과를 보면 최적형상이 가장 작은 소성변형진폭을 나타냄을 볼 수 있다. Table 1에는 각 형상의 소성변형진폭을 나타내었다. 그리고, Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 각 형상이 열 사이클 실험 동안의 소성 변형의 움직임을 나타내었다.

또한, 대략적인 피로수명 계산을 위해 Coffin-Manson의 수명 예측식을 이용하였다.

$$\epsilon_a \cdot N_f^\alpha = 0 \quad (8)$$

피로상수 α 와는 기준에 발표되었던 Sn-37Pb 솔더의 피로상수를 사용하였으며, 피로상수값은 Table 2에 나타내었다⁹⁾. 그리고, 식 (9)에 의해 계산된 값은 Table 3에 나타내었다.

결과에서 알 수 있듯이 Truncated Sphere법과 Surface Evolver가 제안한 솔더 접합부의 형상이 임의의 오차를 가진 다른 형상에 비해 약 4%~8% 우수한 수명을 나타내었다. 이것은 솔더 접합부 형상 예측법이 제시한 형상이 가장 적합한 모델이며, 제품의 수명면에서도 가장 우수하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 최근 각광 받고있는 CSP계열 패키지인 μ BGA의 솔더 접합부의 형상만을 기하학적인 측면에서 연구해 패키지를 설계함에 있어 최적의 형상을 제시하고, 그 형상의 신뢰성을 검증함에 목표를 두고 실시하였다. 연구를 실시함에 있어 먼저, 솔더 접합부의 형상 예측법인 Truncated Sphere법과 Surface Evolver를 이용하여 0.35mm 솔더 볼을 사용한 μ BGA의 솔더 접합부 높

이와 지름을 예측하고, 그 예측 형상을 대상으로 ANSYS(version 5.62)를 이용하여 유한요소 해석을 실시하여 형상의 신뢰성을 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Truncated Sphere법을 이용하여 구현한 형상과 Surface Evolver를 이용하여 구현한 형상을 서로 비교한 결과, 서로의 오차가 ± 0.002 mm로 거의 일치함을 확인하였다.

(2) 형상 예측법으로 구현한 형상을 대상으로 FEA 프로그램(ANSYS ver.5.62)을 사용하여 열 사이클 시험을 실시한 결과, 형상 예측법이 제시한 접합부 형상의 수명이 임의의 오차를 갖는 다른 형상에 비해 약 4%~8% 우수한 것으로 나타났다.

본 연구 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 실질적인 실험을 통하여 대상 형상의 신뢰성을 확보할 필요가 있을 것으로 사려된다. 또한, 현재까지의 제품에 적용되고 있는 솔더 볼의 크기보다 더욱 미세한 솔더 볼이 적용될 패키지에도 형상 예측법이 적용 가능한지 여부를 확인해 볼 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 연구과제인 'Lead-free solder 재료를 이용한 Micro BGA Solder 접합부의 신뢰성에 관한 연구'의 일부분입니다. 또한 관계자 여러분께 감사드립니다. (과제 번호:801-2000-00227)

참고문헌

1. <http://www.semipark.co.kr>, "첨단 반도체 패키징 시장 동향".
2. 이어화, "실장기술의 과제와 전망", 表面實裝技術, 7/8, 129-132 (2001).
3. Steven J. Adamson, "언더필 설계와 공정기법", 表面實裝技術, 7/8, 102-105 (2001).
4. Kuo-Ning Chiang and Chang-An Yuan, "An Overview of Solder Bump Shape Prediction Algorithms with Validations", IEEE Transactions on Advanced Packaging, 24, 158-162 (2001).
5. Hidehisa Sakai, Nobuyoshi Yamaoka, Kazuyuki Ujiie, Masanori Motegi, "Shape Prediction and Residual Stress Evaluation of BGA and Flip Chip Solder Joints", IEEE, 2000 Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 181-186 (2000).
6. Ken Brakke, Surface Evolver Manual, Version 2.14.

- Mathematics Department, Susquehanna University, (1999).
7. 김종민, “클래드 다이패드를 이용한 TSOP 솔더접합부의 수명예측 및 품질 향상에 관한 연구”, 중앙대학교 석사학위 논문, 16 (1998).
 8. 이어화, “최근 각광받고 있는 BGA·CSP 실장 기술 동향, 고밀도 실장 및 고속 응답성 등 전자 기기 적용 추세”, 電子産業情報, SMT/PCB Korea 2001 전시회 특별호, 118-123 (2001).
 9. Y. Kariya, H. Kagawa and M. Otsuka, “Effect of Strain Rate, Hold Time and Third Element on The Fatigue”, Mate 99, January 29-30 (1998).