잔류응력으로 인한 패키지 기판 굽힘 변형량 예측

김철규¹ · 최혜선¹ · 김민성^{2,†} · 김택수^{1,†}

¹KAIST 기계공학과, ²삼성전기

Packaging Substrate Bending Prediction due to Residual Stress

Cheolgyu Kim¹, Hyeseon Choi¹, Minsung Kim^{2,†} and Taek-Soo Kim^{1,†}

¹Department of Mechanical Engineering, KAIST

²Samsung Electro-Mechanics

(2013년 3월 8일 접수: 2013년 3월 18일 수정: 2013년 3월 25일 게재확정)

초 록: 본 연구는 유한 요소 시뮬레이션을 이용하여 계산한 시편의 곡률과 3D 스캐너로 측정된 곡률을 비교하여 패키지 기판 구조의 휨 거동을 예측하는 새로운 분석 방법을 제안한다. 패키지 기판은 프리프레그 경화나 구리 패턴 도금과 같은 다양한 공정을 거치면서 쉽게 휘게 된다. 기판의 휨이 어떤 공정에서 어느 정도 생기는지를 알아보기 위하여 다양한 종류의 시편을 제작하고 각 시편의 형상을 3D 스캐너를 이용하여 측정하였다. 그 후 시편의 형상으로부터 film에 걸리는 잔류 응력을 휨을 이용한 수식으로부터 계산하였다. 패키지 기판에 들어가는 절연체는 수지와 서로 직교 존재하는 섬유로 다발로 구성되어 있는 복합재료로서 이방성을 띄게 되는데 이는 패키지 기판의 독특한 굽힘 거동을 일으킨다. 우리는 유한 요소 법에 의한 휨 변형을 시뮬레이션하고 측정 데이터를 이용하여 시뮬레이션 휨을 비교하였다. 측정된 휨으로부터 계산한 전체 구리 도금 응력은 약 58 MPa이다. 솔더 레지스트와 프리프레그의 경화 응력은 각각 실온에서 13 MPa 및 6.4 MPa 정도이다.

Abstract: This study presents new analysis method to predict bending behavior of packaging substrate structure by comparing finite element method simulation and measured curvature using 3D scanner. Packaging substrate is easily bent and deflected while undergoing various processes such as curing of prepreg and copper pattern plating. We prepare specimens with various conditions and measure contours of each specimen and compute the residual stresses on deposited films using analytical solution to find the principle of bending. Core and prepreg in packaging substrate are made up of resin and bundles of fiber which exist orthogonally each other. Anisotropic material properties cause peculiar bending behavior of packaging substrate. We simulate the bending deflection with finite element method and verify the simulated deflection with measured data. The plating stress of electrodeposited copper is about 58 MPa. The curing stresses of solder resist and prepreg are about 13 MPa and 6.4 MPa respectively in room temperature.

Keywords: Packaging substrate, Curvature, Warpage, Bending, Residual stress

1. 서 론

전자제품의 휴대성을 높이기 위한 경박 단소화와 고성능화의 추세에 따라 인쇄 회로 기판 (PCB)도 또한 얇아지고 동시에 집적도는 높아지게 되었다. 이런 제품의 경향에 따라 박판의 굽힘 변형이 심각한 문제로 대두되었다. 대면적 다층 박판은 많은 공정을 거치면서 누적된 잔류 응력에 의하여 쉽게 변형된다. 그러나 워낙 다양하고 복잡한 공정이 자동화되어 있어 어느 공정에서 어떤 원인으로 굽힘 변형이 발생하는지 정확하게 파악하기 힘든

실정이다. 굽힘 변형은 기판 제작 과정에서 자동화된 생산 라인이 막히게 되는 원인이 되므로 생산 수율을 크게 낮춘다. 더욱이 기판의 후처리 등으로 휨을 줄인다 하더라도 박판을 이용해 전자 부품을 만드는 과정 중에 다시 굽힘 변형이 빈번하게 발생하여 수율을 다시 크게 낮추게 된다. 따라서 다층 박판의 굽힘 변형의 발생 원인을 근본적으로 이해하고 소재와 공정을 최적화함으로써 굽힘 변형 문제를 근절할 필요가 있다.

박막의 굽힘 변형 연구는 20세기 초 Stoney's equation 으로부터 시작한다.¹⁾ 얇은 film이 도포된 기판의 휨에서

[†]Corresponding author

E-mail: tskim1@kaist.ac.kr, minsung.dragon.kim@samsung.com

© 2013, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

stress를 계산하는 가장 기초적이며 일반적인 적용 방법이다. 하지만 Stoney's equation은 많은 선형 가정을 포함하고 있어 실제로 적용하기에는 무리가 있다. 그 후에 Stoney's equation을 확장하여 비선형성이 포함된 여러 연구들이 활발하게 발전하여 좀 더 일반적인 경우에도 적용을 할 수가 있었다.^{2,3)}

PCB 기판의 경우, Core의 물성과 공정과정에서 받는 영향이 휨에 영향을 준다.^{4,5)} 본 연구에서는 굽힘 변형을 분석하기 위해 bilayer 시편을 제작하였고 구리 도금 공정이나 프리프레그, 솔더 레지스트의 경화 공정 등을 시행하였을 때의 굽힘을 측정하였다. 굽힘 측정에는 3D 스캐너로 시편 전체 형상을 데이터화 하였고 이를 이용하여 시편의 휨을 계산 할 수 있었다. 휨으로부터 계산한 잔류응력을 유한 요소 시뮬레이션의 결과와 비교하여 계산한 잔류응력이 얼마나 유효한가를 검증하였다.

2. 연구내용

2.1. 굽힘 변형 분석 방법

다층 박판의 굽힘 변형을 분석하기 위하여 굽힘 변형의 분포를 측정해야 한다. 이 과정은 박판의 굽힘 변형량, 굽힘 변형 모드(convex, concave), 굽힘 변형 방향(orientation)을 계산하기 위한 데이터를 추출하는 과정이다. 이를 이용하여 3D fitting을 하게 되면 fitting 된 식으로부터 곡률을 계산할 수 있다. 곡률을 계산한 후에는 곡률로부터 대변형(large deformation)에 사용 가능한 analytic model에 대입하여 잔류응력을 직접 계산한다.⁶⁾ 계산된 잔류응력을 유한 요소 시뮬레이션 모델에 대입하고 대변형과 bifurcation을 고려하여 박판의 굽힘 변형을 계산한다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 굽힘 변형량, 굽힘 변형 모드, 굽힘 변형 방향들의 항목에 대하여 실제 기판의 결과와 비교 및 검증하게 된다. 이를 도식화 하면 Fig. 1와 같다.

2.2. 곡률 계산

다층 박판의 굽힘 변형을 측정한 image(Fig. 2)로부터 굽힘량 $w(x, y)$ 에 대한 식을 fitting할 수 있다. 굽힘량 $w(x,$

Fig. 1. Schematic of warpage analysis mechanism.

Fig. 2. Image of test board.

y)에 대한 미분을 통하여 박판의 곡률을 다음과 같이 계산할 수 있다. 각 식은 X축 곡률, Y축 곡률, 비틀림 휨 정도를 나타낸다.

$$K_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad K_y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad K_{xy} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (1)$$

Fig. 2의 측정 시편은 principle axis가 특정한 방향으로 회전해 있다. 회전한 정도를 고려하여 principle axis 방향에 따라 아래 식과 같이 주 곡률을 구한다.

$$K_1 = \frac{1}{2} [K_x + K_y + \sqrt{(K_x - K_y)^2 + 4K_{xy}^2}] \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} [K_x + K_y - \sqrt{(K_x - K_y)^2 + 4K_{xy}^2}] \quad (3)$$

2.3. Bifurcation

응력을 받는 박판의 경우에 굽힘 변형이 일어나게 되는데 초기의 작은 응력에 대해서는 중심부에서 모든 방향으로 동등하게 휘는 spherical shape의 곡률을 보이게 된다. 하지만 응력이 과하게 걸리게 되면 박판은 spherical shape을 유지할 수 없다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 좌우 대칭으로 감싸는 모양은 물리적으로 형태를 유지하기 힘들다.⁷⁻⁹⁾

응력을 효과적으로 해소하기 위해 박판은 한 쪽 방향으로 휘게 되는데 이 때의 분기점이 bifurcation의 시작점이다. Bifurcation 이후에는 한쪽 방향의 곡률은 0에 가

Fig. 3. Bifurcation phenomenon.

까워지고 다른 쪽의 곡률은 매우 커지게 된다. Bifurcation은 기판에 걸린 잔류응력과 기판의 종횡비에 의해 복합적으로 일어나게 되는데 잔류응력과 종횡비가 클수록 bifurcation은 빨리 일어나게 된다.^{10,11)}

2.4. 응력 계산

기존의 굽힘 변형을 다루는 논문의 경우에는 substrate에 비해 film이 매우 얇으며 변형이 substrate의 두께에 비해 작을 경우에만 적용이 가능하다. 따라서 기판의 변형이 크고 film의 물성을 무시할 수 없을 경우를 고려해 적용 가능한 수식을 사용 하였다.¹²⁾

$$R = \frac{d_s}{6 \frac{Y_f d_f}{Y_s d_s} \epsilon} \frac{\left[1 - \frac{Y_f}{Y_s} \left(\frac{d_f}{d_s} \right)^2 \right] + 4 \frac{Y_f d_f}{Y_s d_s} \left(1 + \frac{d_f}{d_s} \right)^2}{(1 + \nu) \left(1 + \frac{d_f}{d_s} \right)} \quad (4)$$

Y_f, Y_s 는 film과 substrate의 Young's modulus를 의미하고 d_f, d_s 는 각각의 두께, ν 는 passion ratio를 나타낸다. 본 수식은 강한 잔류응력으로 인해 bifurcation이 일어난 이후의 시편에 대해서 적용 가능하다. 잔류응력을 계산할 때의 가정은 film이 도포되기 전의 substrate는 stress-free 상태라는 것이다. substrate 위의 film은 잔류응력으로 인해 변형하게 되는데 film에 걸리는 stress를 계산하기 위해서는 준비한 시편은 film 도포 전에 굴곡이 없는 substrate위에 film을 도포해야 한다.

곡률을 측정하여 수식에 대입하면 strain 값을 구할 수 있다. 이를 가지고 Film의 Young's modulus를 이용하면 film에 발생하는 잔류응력을 계산이 가능하다.

2.5. 재료의 방향 별 물성 고려

박판에 들어가는 Core나 프리프레그는 resin과 fiber가 합쳐져서 복합재료를 이루고 있다. 이 때 fiber는 서로 직교 방향으로 직조되어 있으므로 방향에 따라서 재료의 물성(Young's modulus, CTE 등)이 다르다.

직접 실시한 프리프레그의 물성 측정 시험에서는 Fig. 4와 같이 방향 별로 다른 물성을 가지는 것이 확인 되었다. Viscoelastic solid 경우에는 storage modulus와 loss

Fig. 4. Modulus measurement.

modulus로 물성을 측정한다. storage modulus의 경우에는 elastic portion의 저장된 에너지를 나타내며 loss modulus의 경우에는 viscous portion에서 열 에너지 등으로 빠져나가는 에너지를 뜻한다. 따라서 storage modulus는 Young's modulus와 일맥상통한다. Fiber가 90도로 직조된 Core의 경우 45도 방향의 Young's modulus가 가장 약하고 그로 인해 기판의 휨에도 영향을 미치게 된다.

2.6. 장 방향/단 방향 휨 발생 원리

앞서 설명한 bifurcation 현상에서 과한 잔류응력으로 인해 기판이 한쪽 방향으로 변형하게 되는데 만약 박판이 등방성이며 잔류응력이 일정하다면 기판의 휨은 film strain energy release가 가장 큰 방향인 장 방향으로 휘게 된다. 하지만 실제 기판을 보면 다양한 방향으로 변형하는 것을 확인 할 수 있다.

실험을 위한 다층 박판 시료는 패널의 크기를 갖는 박판을 먼저 제작한 후 3D 스캐닝이 가능한 크기로 절단하여 제작하였다. 이 때 절단된 박판의 굽힘 변형은 절단 전 패널의 굽힘 변형을 유지한다. 따라서 실제 잔류응력이 어떻게 걸리는지를 알기 위해서는 절단 전 패널의 휨을 분석해야 한다. 패널의 휨은 종횡비(aspect ratio)와 warp/fill 방향 별 물성(Young's modulus) 차이에 의해 영향을 받는다.

Fig. 5와 Table 1은 방향 별 물성(Warp/fill Young's modulus)을 다르게 주었을 때의 휨 모드를 나타낸 시뮬레이션 결과와 시뮬레이션 조건이다. 같은 종횡비에서 시편의 휨 모드는 Young's modulus의 비에 의해 결정이 된다. 방향 별 물성의 차이가 패널 사이즈의 종횡비 차이보

Fig. 5. Curvature mode with warp/fill modulus.

Table 1. Curvature mode simulation condition.

	Aspect ratio (mm)	Thickness (mm)	Ratio of Young's Modulus(GPa)
Core	415:510	0.15	(a)28:28 (b)28:22.7 (c)28:20
SR	415:510	0.04	3.2

다 작을 경우 시편은 장 방향으로 휘게 되지만 방향 별 물성의 차이가 패넌 사이즈의 종횡비 차이보다 클 경우 시편은 단 방향으로 휘게 된다. 시뮬레이션에서는 두 가지의 변수(종횡비, Warp/fill 물성의 차이)에 대해서만 검증은 하였지만 실제 패넌의 굽힘 변형 orientation은 도금 및 경화 잔류응력 방향, film과 substrate의 두께에 의해 복합적으로 결정된다.

2.7. 상온/고온 비틀림 원리

실제 박판의 굽힘 변형 경향을 보면 장 방향/단 방향뿐

Fig. 6. Test board warpage at room temperature. **Fig. 7.** Twist phenomenon while increasing temperature.

만 아니라 상온, 고온에서 비틀림 현상이 일어난다. Fig. 6 은 Young's modulus가 30 GPa인 솔더 레지스트 20 μm 를 Young's modulus가 28 GPa인 0.15 mm Core위에 적층한 시편이다. Fig. 6의 시편처럼 상온에서 비틀림 휨이 발생하는 경우도 있고 상온에서는 한 쪽 방향의 굽힘 변형을 가지지만 온도를 올리는 과정에서 Fig. 7과 같이 비틀림 굽힘 변형이 생기는 경우도 존재한다. 기판에 걸리는 전단응력은 직접 구할 수 없기 때문에 principle stress와 x, y축 방향의 stress를 구한 Mohr circle을 이용하여 전단응력을 계산할 수 있다.

고온 비틀림의 경우에는 CTE의 방향 별 크기 차이로 인해 생긴다. 직교된 fiber로 인해 warp/fill방향과 45도 방향의 CTE가 다르게 된다. 승온 과정에서 방향 별로 서로 다른 크기의 strain이 증가하게 되므로 주 곡률 방향이 변하게 된다.¹³⁾

2.8. 유한 요소 시뮬레이션 모델링

대변형으로 인한 bifurcation 현상을 고려하기 위해 기존에 사용하던 선형 모드 시뮬레이션이 아닌 비선형 모드 시뮬레이션을 한다.

Fig. 8는 같은 조건에서 선형/비선형 모델의 유한 요소 시뮬레이션 결과에 대한 비교이다. 시뮬레이션 조건은 Table 2에 기술되어 있다. 시뮬레이션 모델은 shell composite 모델을 사용하였으며 in-plane 방향으로 stress

Fig. 8. Linear/Non-linear simulation result and test board result.**Table 2.** Linear/nonlinear simulation condition.

	Aspect ratio (mm)	Thickness (mm)	Young's Modulus (GPa)
Core	100:50	0.15	28
Cu	100:50	0.02	90

Table 3. Core Anisotropy material property.

	Young's Modulus (GPa)	Poisson ratio	Shear Modulus (GPa)
Core	28(x,y direction)	0.2	8 GPa

를 주어 어떻게 변형하는지를 살펴보았다. 왼쪽의 선형 모델 시뮬레이션의 경우에는 대변형에도 불구하고 spherical shape의 곡률을 유지하고 있다. 중앙의 비선형 모드 시뮬레이션의 경우에는 잔류응력으로 인한 대변형이 고려되어 실제 시편과 같이 한쪽으로 cylindrical shape으로 변형하는 것을 확인할 수 있다.

구리 층의 잔류응력에 의한 박판의 굽힘 변형을 시뮬레이션하기 위하여 구리 잔류응력을 시편 전체가 아닌 구리 층에 직접 입력하였다. 상기의 시뮬레이션은 계산 값인 58MPa를 대입하였다. 기판의 실제 이방성 물성을 고려하기 위해 Laminar mode의 물성 대입을 사용하여 각 축 방향의 Young's modulus, shear modulus, Poisson ratio를 직접 입력해주었다.

3. 결 과

3.1. 굽힘 변형 주요 인자

상온에서 발생하는 다층 박판의 굽힘 변형은 CTE mismatch로 설명할 수 없다. 상온의 굽힘 변형 발생 원인은 도금 및 PPG, SR의 경화 잔류응력이다.

3.2. 재료의 방향 별 물성 고려

박판에 사용되는 재료는 resin과 fiber가 합쳐진 복합재료로서 fiber는 서로 직교 방향으로 직조되어 있다. 그로 인해 방향에 따라 재료의 물성이 달라진다. 방향 별 물성을 따로 고려해 주어 박판 굽힘 변형의 계산 정확성을 높였다.

3.3. 단 방향/장 방향 휨 발생 원리

기판의 휨은 공정 후의 패널의 휨을 따라가게 되는데 절단 방향에 따라 장, 단 방향 혹은 비틀림 휨 형태의 모드를 보인다. 기판의 물성이 등방성이며 잔류응력이 일정하다면 기판의 휨은 film strain energy release가 가장 큰 방향인 장 방향으로 휘게 된다고 예상을 할 수 있지만 실제 박판의 이방성 물성을 고려해야 한다. 패널의 중형비가 warp/fill 방향의 물성 비율보다 작다면 패널의 굽힘 변형 모드는 장 방향에서 단 방향으로 바뀔 수 있다. 실제 패널 휨의 orientation은 패널의 중형비, 방향 별 물성, 도금 및 경화 잔류응력에 의해 복합적으로 결정된다.

3.4. 상온/고온 비틀림 휨 원리

비틀림 굽힘 변형 현상은 공정으로 인해 발생하는 잔류응력 중에서도 전단 응력에 의해 발생한다. 전단 응력은 직접 구할 수 없기 때문에 주 응력과 x, y축 방향의 응력을 계산 한 후 Mohr circle을 이용하여 계산할 수 있다. 고온에서 비틀림 굽힘 변형의 경우 CTE의 방향 별 차이에 의해서 발생하며 fiber로 인한 기판의 Anisotropic한 성질에 의해서 나타나게 된다.

Fig. 9. Residual stress comparison with different material.

3.5. 잔류응력 계산

각 재료 별로 계산된 잔류응력은 Fig. 9와 같이 Cu ~56 MPa, PPG ~13 MPa, SR ~6.4 MPa로 Cu에 발생한 잔류응력이 다른 재료에 비하여 월등히 높았다. 시편은 동일한 substrate 위에 도금 전류 밀도가 다른 구리와 두 가지 종류의 솔더 레지스트 그리고 프리프레그를 film을 사용하여 각 bilayer로 이루어져 있으며 사용하였다. 판넬 크기(405 mm*510 mm)로 공정을 거치고 그 후 라우팅을 하여 시편을 제작하였다. Substrate의 물성은 warp/fill 방향에 대해서 28 GPa이고 두께는 0.15 mm이다.

4. 결 론

본 연구는 기판의 경박단소화로 공정과정에서 외력으로 인해 쉽게 변형되는 기판의 휨 현상을 분석하는 mechanism 연구를 수행하였다. Stress-free substrate 위에 Cu, PPG, SR 등을 적층하여 측정 시편을 만들고 휨을 3D scanner를 이용하여 측정하였다. 측정된 휨으로부터 시편에 걸리는 stress를 분석하였고 simulation을 통해 실제 시편과 굽힘 변형량, 굽힘 변형 모드, 굽힘 변형 방향등을 비교, 검증하였다. 사용되는 Core의 경우 재료의 이방성으로 인해 휨 경향이 장방향과 단방향 또 비틀림 휨이 혼재되어 발견되었으며 기판은 라우팅 전 전체 패널의 휨을 따라갔다. 종류별 잔류응력의 크기는 Cu가 ~58 MPa 정도로 가장 컸으며 PPG와 SR은 각각 ~13 MPa, 6.4 MPa 정도로 Cu에 비해 작은 값을 보였다. 상기의 잔류응력은 bilayer 상태의 film에 걸리는 잔류응력을 계산하였다. 실제 제품은 패턴의 효과로 시표 제작조건이 달라질 수 있어 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 삼성전기의 지원 및 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2012R1A1A1006072)으로부터 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. G. G. Stoney, "The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis", Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 172 (1909).
2. S. Senderoff, and A. Brenner, "The Electrolytic Preparation of Molybdenum from Fused Salts I. Electrolytic Studies", Journal of The Electrochemical Society 101, 16 (1954).
3. D. Fahnline, C. B. Masters and N. Salamon, "Thin Film Stress from Nonspherical Substrate Bending Measurements", Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films 9, 2483 (1991).
4. I. S. Youn, "Warpage Improvement of PCB with Material Properties Variation of Core(in Kor)", J. Microelectron. Packag. Soc., 13(2), 1 (2006).
5. C. G. Song and S. H. Choa, "Numerical Study of Warpage and Stress for the Ultra Thin Package(in Kor)", J. Microelectron. Packag. Soc., 17(4), 49 (2010).
6. H. Gleskova, I. C. Cheng, S. Wagner, J. C. Sturm, and Z. Suo, "Mechanics of Thin-Film Transistors and Solar Cells on Flexible Substrates", Solar Energy 80, 687 (2006).
7. H. Lee, A. J. Rosakis and L. Freund, "Full-field Optical Measurement of Curvatures in Ultra-thin-film-substrate Systems in the Range of Geometrically Nonlinear Deformations", Journal of Applied Physics 89, 6116 (2001).
8. N. Salamon, and C. B. Masters, "Bifurcation in Isotropic Thin film/substrate Plates", International journal of solids and structures 32, 473 (1995).
9. B. D. Harper and W. Chih-Ping, "A Geometrically Nonlinear Model for Predicting the Intrinsic Film Stress by the Bending-plate Method", International journal of solids and structures 26, 511 (1990).
10. C. B. Masters and N. Salamon, "Geometrically Nonlinear Stress-deflection Relations for Thin Film/substrate Systems", International journal of engineering science 31, 915 (1993).
11. N. Guyot, Y. Harmand and A. Mézin, "The Role of the Sample Shape and Size on the Internal Stress Induced Curvature of Thin-film Substrate Systems", International journal of solids and structures 41, 5143 (2004).
12. H. Gleskova, I.-C. Cheng, S. Wagner, and Z. Suo, "Mechanical Theory of the Film-on-substrate-foil Structure: Curvature and Overlay Alignment in Amorphous Silicon Thin-film Devices Fabricated on Free-standing Foil Substrates", in Flexible Electronics: Materials and Applications. W. S. Wong and A. Salleo, Eds., pp.29-51, Springer, New York (2009).
13. C. Dulescu, J. Naumann, M. Stockmann, and S. Nebel, "Characterisation of Thermal Expansion Coefficient of Anisotropic Materials by Electronic Speckle Pattern Interferometry", Strain 42, 197 (2006).