

코어 물성 변화에 따른 인쇄회로기판의 warpage 개선

윤일성*

삼성전기

Warpage Improvement of PCB with Material Properties Variation of Core

Ilsoung Yoon*

Samsung Electro Mechanics Co., LTD. Meaetan 3-Dong, Yeongtong-Gu,
Suwon, Gyunggi-Do, Korea 443-743

초 록: 본 논문에서는 솔더 레지스트(solder resist)의 두께와 코어의 물성에 따른 인쇄회로기판의 휨의 크기와 형상에 대하여 연구하였다. 인쇄회로기판의 굽힘 변형은 적층되는 재료의 열팽창계수의 차이에 의해 발생한다. 따라서 굽힘 변형의 감소를 위해서는 열팽창계수의 차이가 작은 적층 재료를 사용하는 것이 필요하며, 구조 형상에서도 상면과 하면의 불균일성을 완화시킬 필요가 있다. 또한, 적층 재료에서 코어의 강성을 높여 휨의 발생을 억제할 수 있다. 코어를 이루는 복합재료는 적층 순서와 섬유 각에 따른 물성 특성의 방향성에 따라 굽힘과 비틀림이 연성되는 현상을 보이며, 이와 같은 성질을 이용하면 휨을 제어할 수 있다. 본 연구에서는 2층으로 구성된 chip scale package (CSP) 기판의 휨에 대한 연구로, 실험 및 유한 요소해석 툴을 이용하여 개선 결과를 도출하였다.

Abstract: In this paper, warpage magnitude and shape of printed-circuit board in case that properties of core and thickness of solder resist are varied are investigated. The cause of warpage is coefficient of thermal expansion differences of stacked materials. Therefore, we need small difference of coefficient of thermal expansion that laminated material, and need to decrease asymmetric of top side and bottom side in structure shape. Also, we can control occurrence of warpage heightening hardness of core in laminated material. Composite material that make core are exploited in connection with the structural bending twisting coupling resulting from directional properties of fiber reinforced composite materials and from ply stacking sequence. If we use such characteristic, we can control warpage with change of material properties. In this paper, warpage of two layer stacked chip scale package is investigated, and evaluate improvement result using an experiment and finite element method tool.

Keywords: Warpage, Composite material, Fiber angle, PCB, Solder resist, Core

1. 서 론

인쇄회로기판(printed circuit board : PCB)의 굽힘변형(warpage)은 지속적으로 발생하는 문제로 현재 주요 문제인 깨짐, 층간 들뜸(delamination)과

더불어 품질에 가장 영향을 많이 주는 현상이다. PCB는 여러 재료가 적층이 되어 이루어진 구조물로서, 굽힘변형의 주요 원인은 각 적층 재료의 열팽창 계수(coefficient of thermal expansion : CTE)의 차이에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있으며,

*Corresponding author
E-mail: ilsoung.yoon@samsung.com

기타 영향을 미치는 요인으로는 각 재료의 탄성계수(Young's modulus), 공정 중에 가해지는 온도 변화, 흡습, 기계적인 하중 등이 있다. 기판의 휨은 적층 공정 시 가해지는 온도 변화에 따른 수축과 팽창의 반복에 의해 발생하며, 따라서, 여러 요인 중 온도에 따른 물성의 영향을 가장 크게 받는다. 복합재료는 비강성과 비강도가 등방성 재료에 비해 크고, 섬유각을 변화시켜서 원하는 방향으로 강성을 조절할 수 있으므로 기판의 휨 및 비틀림 등의 변형의 억제가 가능하다.^{2,4)}

연구내용은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 솔더레지스트의 두께의 변화에 따른 기판의 굽힘 변형의 영향을 파악하고, 두 번째로는 코어의 적층각을 변화시켜, 굽힘 및 비틀림에 대한 성질을 향상 시키고자 한다.

기판의 굽힘 변형은 적층재료 간의 열팽창 및 수축의 차이에 의해 발생하므로, 이 차이를 줄이는 것이 중요하다. 따라서 적층 재료의 두께 및 조성을 변화시켜 굽힘 변형이 최소화 되도록 하는 것이 필요하다. 따라서 상면과 하면의 솔더레지스트의 두께를 변화시키거나, 더미 부분의 구리 점유 부분의 형상을 변화시켜, 구리와 솔더레지스트의 조성비를 변화시키면 굽힘 변형의 크기가 달라지게 된다. 또한, 굽힘에 대한 강성을 크게 하는 방법이 있다. 이 경우에는 적층재의 강성을 크게 하여야 하는데, 솔더레지스트나 구리는 어느 정도 정해져 있으므로, 코어의 강성을 크게 하여야 한다.

코어를 이루고 있는 복합재료는 다음과 같다.

Fig. 1 에서와 같이 기본 구조는 Fig. 1 a)와 같이 섬유가 직조 되어있는 상태이며 이때 물성치는 각각 x, y, z 축 방향으로 다른 값을 가진다. 이때, Fig.

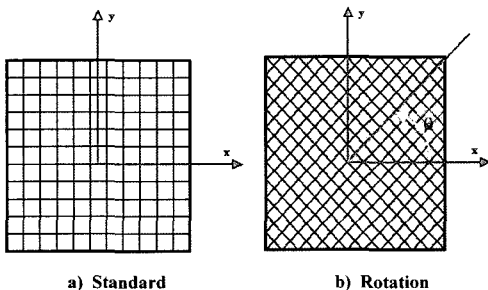


Fig. 1. Fiber angle shape

4 b)와 같이 섬유각을 변화시키면 x, y, z 축방향의 물성이 기본구조와는 다른 값을 가지며, 코어의 물성치가 바뀌는 것을 알 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 이론 해석

복합재료로 구성된 판은 2장 이상의 적층에 의해 구성되어있으며, 각 적층 판의 물성 특성, 적층 구조물의 두께 등에 의해 기계적 성질이 달라질 수 있다. 인쇄회로기판도 이종 재료간의 적층 판 구조를 이루고 있으며, 특히, 기판의 코어는 레진과 섬유가 직조된 복합적층 구조를 이루고 있다. 이 경우에는 섬유각의 변화를 통하여 코어의 기계적 특성을 향상시킬 수 있다.

2.2 범위장

인쇄회로기판의 변형을 FSDT(first order shear deformation plate theory)로 적용한 경우 각 변위 변수의 함수로 표시된 변위 벡터는 다음과 같다.⁵⁻⁷⁾

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_o(x, y) + z\beta_x(x, y) \\ v(x, y, z) &= v_o(x, y) + z\beta_y(x, y) \\ w(x, y) &= w_o(x, y) \end{aligned} \tag{2-1}$$

여기에서 u_o, v_o, w_o 는 각각 x, y, z 축 방향의 병진 변형(translation)을 나타내며, β_x, β_y 는 x, y 축에 관한 회전각(rotation angle)을 나타낸다.

General orthotropic 복합재료의 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} & 0 & 0 & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} & 0 & 0 & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{13} & \bar{Q}_{23} & \bar{Q}_{33} & 0 & 0 & \bar{Q}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} & 0 \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{36} & 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \epsilon_x - \alpha_x T \\ \epsilon_y - \alpha_y T \\ \epsilon_z - \alpha_z T \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} - \alpha_{xy} T \end{bmatrix} \tag{2-2}$$

이때, 위 첨자 k 는 k 번째 적층 판을 의미하며, \bar{Q}_{ij} 는 k 번째 적층 판의 변환 탄성계수를 나타낸다. 또한 i, j 는 변형률 텐서의 성분이며, T 는 온도, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 는 각각 x, y, z 축 방향 열팽창 계수이다.

구성방정식을 두께방향으로 적분하면 다음과

같은 합 응력(stress resultant: N)과 합 모멘트(stress couples: M) 를 구할 수 있다¹⁻³⁾.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \\ M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$\begin{bmatrix} N_{yz} \\ N_{xz} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{z,y} + \beta_y \\ u_{z,x} + \beta_x \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

여기에서, 행렬 [A],[B],[D]는 다음식과 같이 정의되며 각각 인장강성(extension stiffness), 연성강성(coupling stiffness), 굽힘강성(bending stiffness)를 나타내고, ε^o 는 인장 변형률, κ 는 굽힘 변형률이다. 강성행렬은 \bar{Q}_{ij} 에 의해 결정되며, \bar{Q}_{ij} 는 섬유각의 조절에 의해 결정된다. 따라서, 섬유각을 변화시켜 강성의 최적화를 이룬다면, 층간 열 팽창계수의 차이에 의해 발생하는 굽힘의 억제가 가능하다.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \bar{Q}_{ij}^k dz \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \bar{Q}_{ij}^k z dz \\ D_{ij} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \bar{Q}_{ij}^k z^2 dz \end{aligned} \quad (2-5)$$

3. 해석 모델 및 실험 조건

3.1 해석 모델

본 논문에서는 Table 1과 같은 층 구성을 갖는 2

Table 1. Thickness of layers

Layer	Thickness (μm)
L1	15
L2	15
Core	60
SR	15

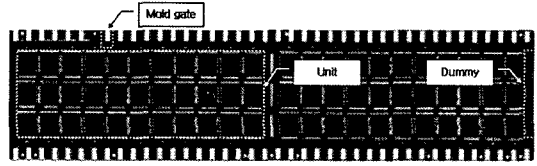


Fig. 2. Chip scale package model.

층 CSP (chip scale package)의 굽힘 변형의 개선 방안에 대하여 연구하였다.

각층은 회로층인 L1,L2, 그리고 기판 표면 회로의 보호와 전기적 절연 안전성 유지를 위한 솔더 레지스트, 코어로 구성되어 있다.

해석하고자 하는 인쇄회로기판의 모델은 fig. 2와 같이 몰드 게이트(mold gate), 더미(dummy), 유닛(unit) 부분으로 나눌 수 있다.

해석모델의 크기는 190 × 48.175 mm (가로×세로), 두께 0.12 mm이다. 기판은 크게 몰드 게이트(mold gate), 더미(dummy), 유닛(unit) 부분으로 나눌 수 있으며, 각각의 부분에는 신호전달을 위해 회로가 형성되어 있지만, 본 연구에서는 해석의 용이성을 위해 미세한 회로의 모델링은 하지 않았으며, 각 부분에 평균 물성을 적용하여 모델링하였다. 굽힘 변형 해석을 위해 유한요소 해석 상용 툴인 ABAQUS를 이용하였으며, 각 적층을 고려하여 모델링하였다.

경계조건은 모델의 중간점을 고정하였으며, 하중조건은 fig. 4와 같이 온도가 150°C에서 상온인

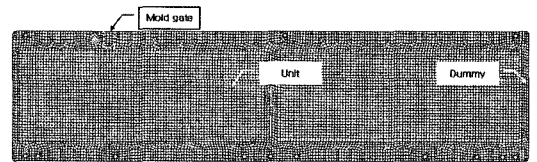


Fig. 3. FE model.

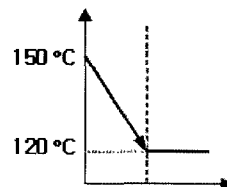


Fig. 4. Thermal loading condition.

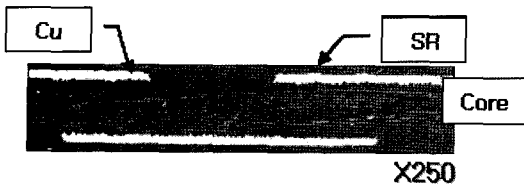


Fig. 5. Section configuration.

25°C로 냉각하였고, 시간에 대한 영향은 무시하였다. 각 구성 물질의 응력이 없는 상태(stress free)는 150°C로 가정하였으며, 각층의 적층을 고려하여 각각의 물성치를 인가하였으며, 회로가 있는 층은 각 재질의 점유율을 고려하여 평균 물성치를 사용하였다. (Appendix A)

섬유각의 변화 범위는 섬유가 서로 90°로 직조되어 있다고 가정할 때, 0°에서 90°까지 변화하며, 이번 연구에서는 x, y 방향의 물성이 비슷하므로 0°, 15°, 30°, 45°의 경우에 대하여 영향을 파악하였다.

복합재료인 코어는 적층에 따른 물성 변화가 가능하므로 코어의 물성 변화를 위해서 총 60 μm 의 두께를 갖는 코어를 30 μm 두께의 2층 판으로 적층된 형상으로 모델링하였다. 기판의 단면을 보면 Fig. 5와 같이 직조 섬유(woven fiber)가 2층으로 형성된 것으로 보아서, 코어가 2개의 적층판으로 구성된 것을 알 수 있다. 이 경우에는 각 2층의 섬유각을 0°, 15°, 30°, 45°의 4수준으로 하여 16번의 경우의 수에 대하여 결과를 도출하였다.

3.2 실험 조건

본 논문에서는 기판의 휨 측정을 위하여 fig. 6

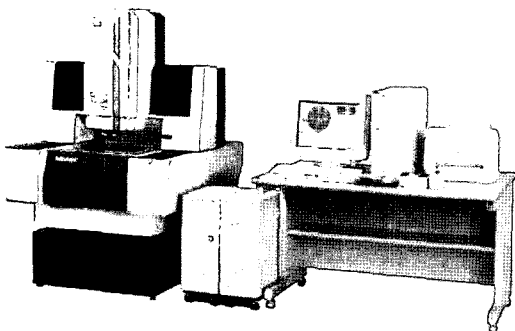


Fig. 6. Equipment for estimation of the substrate warpage (Quick vision, Mitutoyo)

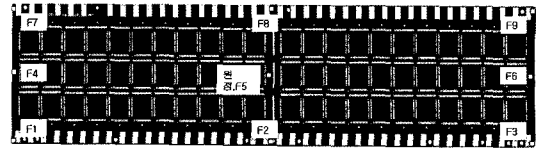


Fig. 7. Measurement point

과 같은 Mitutoyo사의 비접촉식 3차원 측정기인 quick vision을 이용하였으며, 해상도는 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 이다.

휨의 측정은 fig. 7과 같이 9개의 점을 측정하여 최소 지점과 최대 지점과의 편차를 기판의 휨으로 하였으며, 총 10개의 시편을 측정하였다.

측정 시편은 기존 모델과 휨 저감을 위해 상면의 솔더레지스트 두께를 20 μm 로 한 경우이며, 이와 같이 함으로써, 기판의 상면과 하면의 재료의 열팽창 정도를 조절하여 휨을 개선하고자 하였다.

4. 결 과

4.1 솔더레지스트 두께

Fig. 8은 실험값과 시뮬레이션 기법을 이용하여 예측한 상면의 솔더 레지스트 두께 변경모델의 휨 형상이다.

Fig. 8에서 실험값과 시뮬레이션 결과의 형상이 유사한 결과를 보이며, 상면의 솔더레지스트를 15 μm 에서 20 μm 로 5 μm 만큼 상향시킨 결과이다. 실험값은 평균 0.39 mm로 기존 모델 대비 약 26% 감소하는 경향을 보였으며, 시뮬레이션 결과는 약 0.55 mm로 24.5% 감소하는 경향을 보였다. 기판의 유한요소 해석에 있어서, 물성치 및 모델링의 문제가 많은 영향을 미친다. 그러나, 현실적으로 각 적층 물질의 정확한 물성치의 확보가 어려

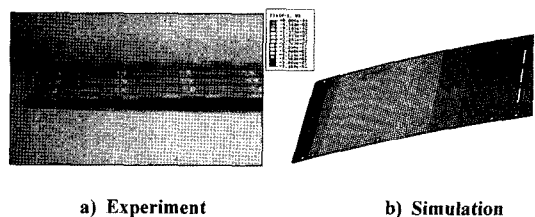


Fig. 8. Warpage shape

우며, 모델링의 경우도 각각의 회로까지 구현이 어려우므로, 정량적인 예측은 어려움이 있으며, 위 결과에서 알 수 있듯이 휨 감소를 위한 정성적인 예측은 가능하다,

4.2 코어의 물성 변경

코어가 30 μm의 2장으로 적층된 경우이며, 각 층의 섬유각을 변화시켜 전체 코어의 물성 변화에 따른 휨 경향을 도출하였으며, 섬유각이 0°, 15°, 30°, 45°의 경우에 대하여 총 16가지 경우에 대한 결과는 다음과 같다.

Table 2의 결과에서 알 수 있듯이 적층각의 조합에 따라 기판의 휨이 크게 차이가 남을 알 수 있다.

Fig. 9는 코어의 섬유각이 0°/0°인 경우로서, 현재 구성되어있는 모델은 이 경우에 해당된다.

복합재료를 구성하고 있는 섬유가 기판의 장축과 단축의 수직방향으로 구성되어 있으므로 휨 형상을 보면 비틀림이 크게 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 섬유각이 15°/45°로 적층한 경우이다.

기존 모델(0°/0°)에 비해 휨이 33.3% 감소하였으며, 형상에 있어서는 끝 모서리 부분이 아래 방향

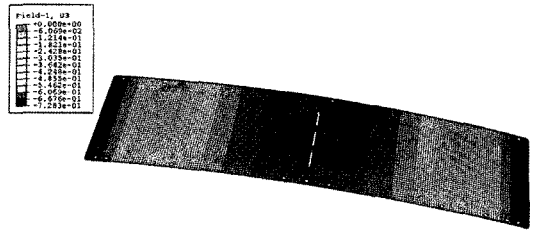


Fig. 9. Warpage shape (0°/0°)

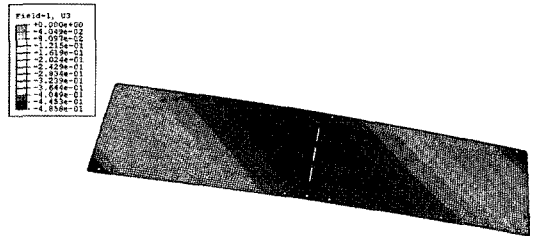


Fig. 10. Warpage shape (15°/45°)

으로 변형이 일어난다. 이는 섬유각이 바뀌면서 기존 모델과 달리 x, y, z 축방향의 강성이 달라져서 생기는 현상이다. 이 현상을 이용하면 원하는 부위의 변형 현상의 제어가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 11은 코어의 섬유각이 45°/0°인 경우로 휨이 기존모델 대비 약 57.1% 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 섬유각이 변환에 따라 기판의 휨이 큰 차이가 남을 볼 수 있었으며, 적층에 대한 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

식(2-3)에서는 굽힘 강성을 나타내며, Fig. 10과 Fig. 11의 결과에 대하여 적층 코어의 온도에 따른 강성을 비교하면 다음과 같다.

Fig. 12는 x축 방향의 굽힘에 대한 강성이며, 온도에 따른 강성의 변화를 나타낸다.

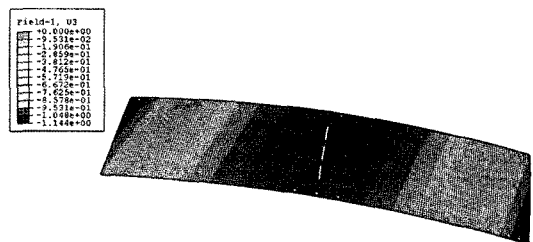


Fig. 11. Warpage shape (45°/0°)

Table 2. Warpage level with fiber angle (Simulation result)

Fiber angle	warpage[mm]
0°/0°	0.728
0°/15°	0.781
0°/30°	0.714
0°/45°	0.564
15°/0°	0.849
15°/15°	0.729
15°/30°	0.692
15°/45°	0.486
30°/0°	0.998
30°/15°	0.884
30°/30°	0.725
30°/45°	0.692
45°/0°	1.14
45°/15°	1.03
45°/30°	0.875
45°/45°	0.719

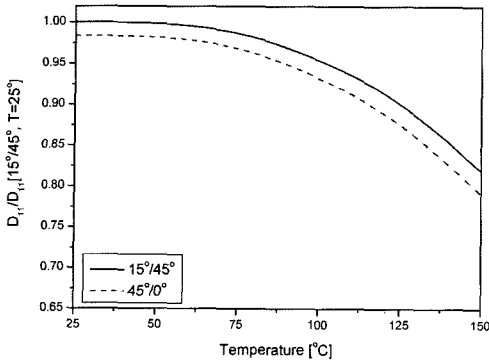


Fig. 12. Variation of bending stiffness with temperature $[D_{11}]$

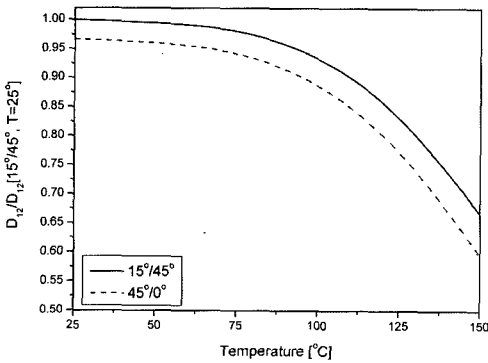


Fig. 13. Variation of bending stiffness with temperature $[D_{12}]$

온도가 커짐에 따라 최대 약 18~21% 정도 강성이 감소하는 것을 알 수 있으며, 가장 작은 변위를 보인 15°/45°의 경우와 가장 변위가 큰 45°/0°의 경우를 비교하면 15°/45°의 경우가 약 2.8% 정도 큰 경향을 보이며, xy 평면의 전단력에 의한 굽힘 강성에 대한 비교 값인 fig. 13의 결과에서도, 15°/45°의 경우가 약 7.2% 강성이 큼을 알 수 있다.

Fig. 14는 해석모델의 단축의 휨의 값의 분포로서 인쇄회로기판은 두께 방향의 구성이 비대칭이며, 또한 좌우의 구성도 몰드 게이트(mold gate) 및 hole, 회로 구성의 영향으로 대칭이 되지 않는다. 따라서, 단순히 장축의 휨만의 문제가 아닌 단축의 휨에도 큰 영향을 받는다. 따라서, 구조적으로 단축 방향으로도 휨이나 비틀림이 발생할 수 있으며, 이와 같은 구조에 반대방향으로 휨이 발생할 수 있도록 섬유각을 변경하면 비틀림 및 단

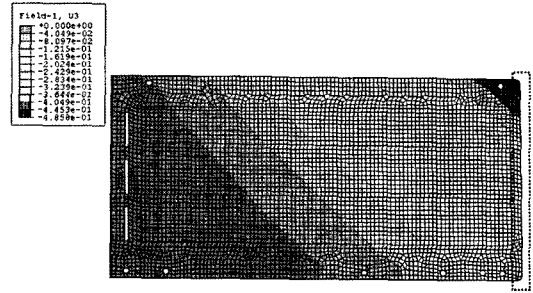


Fig. 14. Warpage shape at PCB end edge

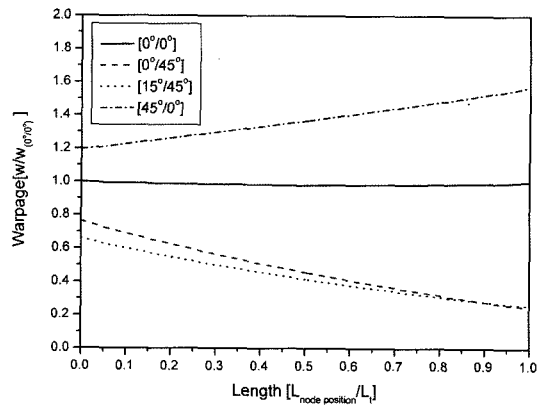


Fig. 15. Warpage at PCB end edge

축 방향으로의 휨 억제도 가능하다.

Fig. 15에서 적층각이 0°/0°인 경우에 단축 방향의 비틀림이 가장 작지만 전체 기판의 휨은 15°/45°인 경우가 가장 작으며, 단축의 비틀림은 0°/45°인 경우가 가장 큼을 알 수 있다. 따라서, 코어의 적층각의 변화에 따른 휨의 경향 파악에 있어서, 전체 휨의 크기이외에 비틀림 크기까지 고려하여, 가장 우수한 구조를 선택할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 휨의 개선을 위해 솔더레지스트 두께의 변화 및 인쇄회로기판을 이루고 있는 코어의 물성 변화에 따른 영향에 대하여 연구하였다. 인쇄회로기판의 열 변형에 의한 휨은 각 층을 이루고 있는 구성 재료간의 열팽창계수의 차이에 의해 발생하며, 층 구성을 이루고 있는 재료 중 복합 재료인 코어의 물성을 변화시켜 그에 따른 휨의 영향을 보았다.

솔더 레지스트 두께의 변화 및 코어의 섬유각 변화에 따른 물성치의 차이에 의해 휨의 크기와 형상에 대한 결과를 도출하였다. 상면의 솔더레지스트를 5 μm 높인 경우 기판의 휨이 약 24.5% 감소하는 효과를 보였으며, 코어의 섬유각의 변화에 대해서는 적층각이 15°/45° 인 경우에 33.3% 감소 효과가 있었다. 기판이 박판인 경우에 회로 보호의 목적인 솔더레지스트의 상하 편차가 큰 영향을 미치므로, 이에 대한 최적화가 필요하며, 실 제품 제작 시 미세한 공정편차 관리가 필요하다.

기판의 설계에 있어서 회로의 변경에 따른 적층 재료의 조성의 변화는 어려움이 있으므로, 솔더레지스트 두께 편차 및 더미 부분의 구리 조성을 변경하는 방법을 많이 사용하지만, 이에 더하여 제품 두께의 변화 없이도 가능한 코어의 강성을 변화시키면 더 좋은 휨 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

앞의 결과에서 알 수 있듯이 복합재료는 비강성과 비강도가 등방성 재료에 비해 크며, 섬유 각을 변화시켜 원하는 방향으로 강성과 강도를 조절할 수 있으므로, 휨의 크기 감소 및 형상제어가 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

1. Masazumi Amagai, "Characterization of chip scale package material", Microelectronics reliability, 39, 1365-1377(1999).
2. M.W.Hyer, Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials, McGraw-Hill, 212-347(1998).
3. O. Song, "Modeling and Response Analysis of Thin-Walled Beam Structures Constructed of Advanced Composite Materials", Ph. D Thesis, VPI&SU, USA, (1990).
4. 윤일성, 송오섭, "위성체 유연 보 구조물의 열 안정성

- 해석", 한국복합재료학회지, 15(3), 18-29(2002).
5. R.F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, 34-267(1994).
6. Weian. Yao, Haitian Yang, "Hamiltonian System Based Saint Venant Solutions for Multilayered Composite Plane Anisotropic Plates". International journal of solids and structures, 38, 5807-5817(2001).
7. Y.K. Cheung, D. Zhou, "Free Vibrations of Rectangular Unsymmetrically Laminated Composite Plates with Internal Line Supports", Computers and Structures, 79, 1923-1932 (2001).

Appendix A.

A-1 Material properties of Cu [at 25°C]

Young's Modulus (MPa)	Poisson's ratio
30000	0.343

A-2 Material properties of solder resist [AUS303]

Temp.(°C)	20	80	120	150	180
E(MPa)	3221	2621	654	118	93
Temp. (°C)	25	50	120	150	180
CTE(α)	4e-5	5e-5	0.0001	0.00013	0.00016

A-3 Material properties of Core [HL832,at 25°C]

Young's Modulus (MPa)	E ₁	E ₂	E ₃
	26330	27850	6000
Shear Modulus (MPa)	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
	10970.8	2307.7	2307.7
Poisson's ratio	ν ₁₂	ν ₁₃	ν ₂₃
	0.2	0.3	0.3
CTE	α ₁₂	α ₁₃	α ₂₃
	1.73e-5	1.59e-5	3.32e-5