

# Prepreg의 점탄성 특성을 고려한 PCB의 Time-Dependent Warpage 분석

양찬희<sup>1</sup> · 구창연<sup>1</sup> · 주민상<sup>1</sup> · 김준모<sup>1</sup> · 장동민<sup>2</sup> · 장재석<sup>2</sup> · 장진우<sup>2</sup> · 김정규<sup>2</sup> · 김택수<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>KAIST 기계공학과

<sup>2</sup>삼성전자

## Time-Dependent Warpage Analysis for PCB Considering Viscoelastic Properties of Prepreg

Chanhee Yang<sup>1</sup>, Chang-Yeon Gu<sup>1</sup>, Min Sang Ju<sup>1</sup>, Junmo Kim<sup>1</sup>, Dong Min Jang<sup>2</sup>, Jae Seok Jang<sup>2</sup>,  
Jin Woo Jang<sup>2</sup>, Jung Kyu Kim<sup>2</sup>, and Taek-Soo Kim<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),  
291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

<sup>2</sup>Samsung Electronics Co. Ltd., 1, Samsungjeonja-ro, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 18448, Republic of Korea

(Received June 7, 2024; Revised June 25, 2024; Accepted June 26, 2024)

**초 록:** 본 연구에서는 인쇄 회로 기판(printed circuit board; PCB) 내 prepreg의 점탄성 특성에 따라 발생하는 time-dependent warpage 거동 양상을 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 응력 완화 시험(stress relaxation test)을 통해 prepreg의 정확한 점탄성 물성을 측정하였으며, 이를 시뮬레이션에 반영하여 warpage 분석을 진행하였다. PCB에 반복적인 열 사이클이 가해지는 상황에서 prepreg의 탄성 특성만을 반영한 경우에는 PCB의 warpage가 초기 상태로 원복되었지만, prepreg의 점탄성 특성까지 반영하였을 때는 그 warpage가 원복되지 못하고 영구적인 warpage 변화가 발생함을 확인하였다. 각기 다른 3개 종류의 prepreg 원자재에 대한 warpage 해석을 진행하여 그 기계적 신뢰성을 비교 분석하였으며, 그 결과 탄성 특성이 점탄성 특성보다 우세한 재료일수록 warpage가 더욱 적게 발생하여 기계적 신뢰성이 우수하였다.

**Abstract:** In this study, the time-dependent warpage behavior caused by the viscoelastic properties of prepreg in a printed circuit board (PCB) was analyzed by finite element method (FEM). The accurate viscoelastic properties of the prepreg were measured by stress relaxation test, which were then incorporated into constructed warpage analysis model. When the PCB was subjected to repeated thermal cycles, the warpage of the PCB was restored to its initial state when only the elastic properties of the prepreg were considered, but when the viscoelastic properties were also considered, the warpage was not restored and permanent warpage change occurred. The warpage analysis for three different types of prepreg was conducted to compare their mechanical reliability, and the results showed that materials with elastic properties dominating over viscoelastic properties experienced less warpage, resulting in better mechanical reliability.

**Keywords:** Printed circuit board (PCB), Warpage, Prepreg, Finite element method (FEM), Viscoelastic property

### 1. 서 론

최근 고도화된 제작 공정 및 설계 구조의 적용으로 인하여 PCB의 warpage로 인한 기계적 신뢰성 문제가 대두되고 있다.<sup>1-3)</sup> 과도한 PCB의 warpage는 다양한 소자 및 칩 패키징(chip packaging)을 조립하는 공정 과정 도중 예상치 못한 불량을 야기할 뿐만 아니라, 특히 소켓 체결 형식 제품의 경우 체결 불량으로 이어져 제품의 최종 수율

과 직결되는 매우 치명적인 요소이다.

제품의 제작 공정 도중, 혹은 마친 직후에 warpage가 발견된다면 적절한 평가 방법 등을 거쳐 사전에 미리 불량 제품을 검출할 수 있다. 그러나 제품의 warpage가 시간이 지남에 따라 심화될 경우 제품이 정상적으로 출하되어 구동되는 와중에 불량이 발생하기 때문에, 그 원인을 정확히 분석 및 검증하여 warpage를 저감하는 데에 더욱 어려움이 있다.

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: [tskim1@kaist.ac.kr](mailto:tskim1@kaist.ac.kr)

© 2024, 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.

PCB의 warpage는 이종 재료들 간의 열팽창 계수 차이, 제작 공정 등에서 발생하는 잔류 응력, 재료의 이방성 등의 굉장히 다양한 요인들이 더욱 복잡해진 내부 형상 구조와 맞물려 발생하는 매우 복잡한 현상이다.<sup>4-8)</sup> 그 중에서도 특히 시간에 따라 변화하는 PCB의 time-dependent warpage 거동에 영향을 미치는 요소 중 대표적인 것이 PCB 내 prepreg의 점탄성 특성(viscoelastic property)이다.<sup>9,10)</sup> 점탄성 특성이란, 한 재료 안에서 동시에 나타나는 점성 특성 및 탄성 특성을 의미한다. 특히 점성 특성을 지닌 재료의 경우 외부에서 가해지는 힘에 대한 재료의 반응이 시간이 지남에 따라 다르게 나타나기 때문에, time-dependent warpage 거동을 이해하고 분석하는 데 있어 이에 대한 고려가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 PCB의 time-dependent warpage 거동에 있어서 prepreg의 점탄성 특성이 미치는 영향에 대해 규명하였다. 우선 prepreg의 응력 완화 시험을 통해 점탄성 물성에 대한 정량적 평가를 진행하였다. 더불어 warpage 분석을 위한 유한요소해석 시뮬레이션 모델을 구축하여, 점탄성 특성 반영 여부 및 각 prepreg 원자재에 따른 PCB의 time-dependent warpage 거동을 분석하였다.

## 2. 방 법

### 2.1. Prepreg의 점탄성 물성 평가

유한요소해석 모델에 활용할 prepreg의 점탄성 물성을 평가하기 위해 각기 다른 온도 환경에서 응력 완화 시험을 진행하였으며, 시험 장비의 구성은 Fig. 1과 같다. 응력 완화(stress relaxation) 현상이란 변성과 탄성 특성을 동시에 지닌 점탄성 재료에 변형이 가해졌을 때 인가되는 응력이 시간이 지남에 따라 감소하는 현상을 의미하고, 이때 시간에 따른 응력 감소량은 해당 재료의 점성 특성과 비례하여 나타난다.

로드셀(load cell) 및 액추에이터(actuator)로 구성된 UTM(AGS-10kNX, SHIMADZU, JAPAN)을 통해 재료에 1%의 변형을 인가한 채로 1시간 동안 그 하중을 측정하였으며, 대류(convection) 오븐을 활용하여 30°C, 80°C, 130°C, 155°C의 4가지 온도 환경에서 동일한 응력 완화 시험을 반복 진행하였다. 총 3개 종류의 각기 다른 prepreg에 대하여 물성 평가를 진행하였다.

특정한 재료에 대하여 시간에 따른 modulus curve의 개형은 항상 동일하며, 온도가 달라질 경우 동일한 개형의 curve가 시간 축 방향으로 shift되어 나타난다. 따라서 하나의 modulus master curve를 도출하고 이를 shift 함으로써 다양한 온도 환경에서의 modulus curve를 예측할 수 있으며, shift factor는 이때 발생한 shift의 크기를 의미한다. 앞선 relaxation test를 통해 각 온도 환경에서 측정된 relaxation curve의 시간 축을 로그 스케일로 변환한 뒤 시간 축 방향으로 shift 하여, 하나의 modulus master curve를 도출할 수 있었으며 이는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서

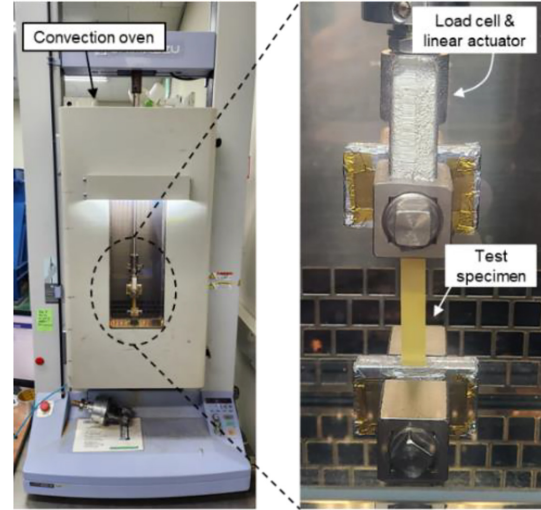


Fig. 1. Experimental setup for stress relaxation test.

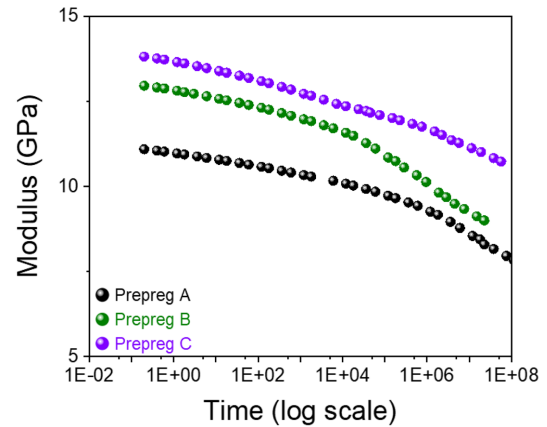


Fig. 2. Fitted modulus master curve for 3 different types of prepreg.

는 WLF(Williams-Landel-Ferry) model을 유한요소해석 모델에 활용하여 온도 및 시간 변화에 따른 재료의 거동을 반영하였으며, 해당 모델은 아래의 수식으로 표현된다.<sup>11,12)</sup>

$$\log a_T = -\frac{C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (1)$$

이때  $a_T$ 는 특정 온도에서의 shift factor,  $T$ 는 온도,  $T_0$ 는 reference 온도,  $C_1$  및  $C_2$ 는 WLF model 계수이다. 각각의 원자재에 대하여 응력 완화 시험을 통해 도출된 shift factor 및 WLF model 계수는 Table 1 및 Fig. 6과 같다.

Table 1. WLF model coefficients for 3 different types of prepreg.

	Prepreg A	Prepreg B	Prepreg C
$T_0$	30	30	30
$C_1$	31.7	20.2	39.4
$C_2$	774.2	501.4	414.9

### 2.2. 유한요소해석 모델링

유한요소해석 시뮬레이션 모델을 구축하고 이를 통해 prepreg의 점탄성 특성에 따른 PCB의 time-dependent warpage 거동에 대한 분석을 진행하였으며, 이를 위해 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 활용하였다. PCB는 14개의 구리층과 13개의 prepreg 층으로 이루어진 133×31×1.398 mm 크기의 복합체로 모델링하였으며, 각 층의 두께는 Table 2와 같다. 최상단의 구리층에는 x 방향 및 y 방향으로

**Table 2.** Layer information of PCB stack-up structure.

Layer	Material	Thickness (μm)
1	Cu	40
2	Prepreg	60
3	Cu	15
4	Prepreg	62
5	Cu	15
6	Prepreg	158
7	Cu	15
8	Prepreg	62
9	Cu	15
10	Prepreg	128
11	Cu	15
12	Prepreg	62
13	Cu	25
14	Prepreg	54
15	Cu	25
16	Prepreg	62
17	Cu	15
18	Prepreg	128
19	Cu	15
20	Prepreg	62
21	Cu	15
22	Prepreg	158
23	Cu	15
24	Prepreg	62
25	Cu	15
26	Prepreg	60
27	Cu	40

**Table 3.** Temperature profile of a thermal cycle.

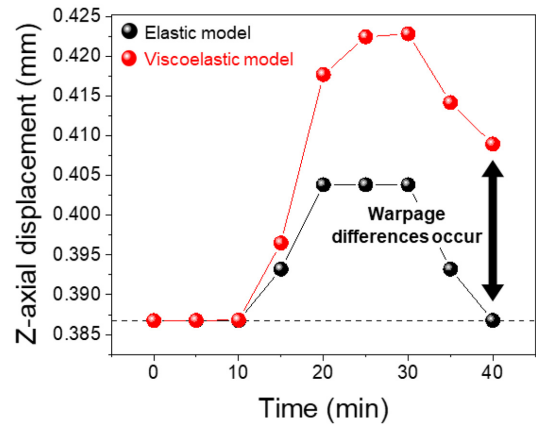
Time (min)	Temperature (°C)
0	0
10	0
20	125
30	125
40	0

85 MPa의 잔류응력을 인가하여 초기 warpage를 유도하였다. 이후 초기 warpage가 존재하는 PCB에 대하여 반복적인 열 사이클이 가해질 때 warpage의 변화를 분석하였으며, 해당 열 사이클의 정보는 Table 3와 같다.

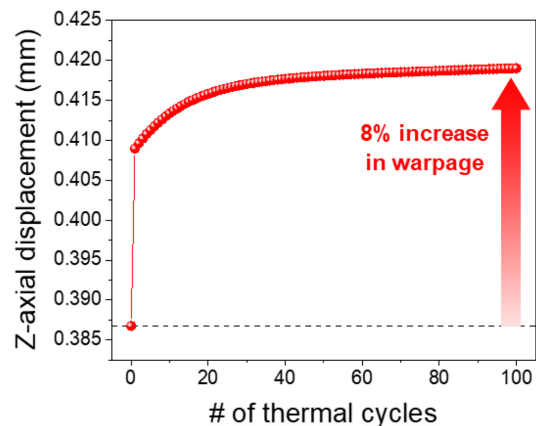
### 3. 실험결과 및 고찰

Prepreg의 점탄성 물성 대입 유무에 따른 PCB의 warpage 변화는 Fig. 3과 같다. Prepreg에 점탄성 물성을 대입하지 않고 탄성 재료로 가정하여 해석을 진행한 탄성 모델의 경우, 열 사이클을 거친 이후에 warpage가 심화되지 않고 동일한 크기의 warpage로 원복되었다. 그러나 prepreg의 점탄성 물성을 반영한 점탄성 모델의 경우 사이클을 거친 이후에 PCB의 warpage가 초기값으로 원복되지 못하고 더욱 심화되는 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 총 100 번의 열 사이클을 가했을 때 PCB의 warpage 변화를 나타낸 그림이며, 이 경우 PCB의 warpage가 꾸준히 심화되어 초기에 비해 약 8.34% 증가하였다.



**Fig. 3.** Warpage change of PCB during one single thermal cycle according to assignment of viscoelastic property of prepreg.



**Fig. 4.** Warpage change of PCB during 100 thermal cycles considering viscoelastic property of prepreg.

PCB의 warpage는 첫 번째 열 사이클에서 가장 큰 변화폭으로 상승하였으며, 그 상승 폭은 열 사이클이 더욱 많이 반복될수록 점차 감소하였다. 반복적인 열 하중이 가해지는 상황에서 prepreg의 점탄성 거동이 PCB warpage에 실질적으로 영향을 미칠 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었으며, 따라서 강건한 기계적 신뢰성의 PCB 설계를 위한 prepreg 원자재 선정에 있어서 그 점탄성 물성이 필수적으로 고려되어야 할 것이다.

총 100번의 열 사이클이 가해졌을 때 각 prepreg 원자재별 PCB warpage의 변화는 Fig. 5와 같다. 초기 warpage는 prepreg A, prepreg B, prepreg C의 순서로 각각 0.387 mm, 0.362 mm, 0.349 mm였으며, 100번의 열 사이클을 겪은 후의 warpage는 각각 0.419 mm, 0.376 mm, 0.358 mm이다. 100번의 열 사이클을 겪는 동안 prepreg A는 8.3 %, prepreg B는 3.9 %, prepreg C는 2.4 %의 warpage 증가율을 보였다. 동일한 하중 상황에 놓인 PCB라도 prepreg의 열·기계적 물성에 따라 발견되는 warpage의 유의미한 차이가 있음을 확인하였으며, warpage가 가장 적어 그 기계적 신뢰성이 우수한 순서는 prepreg C, prepreg B, prepreg A

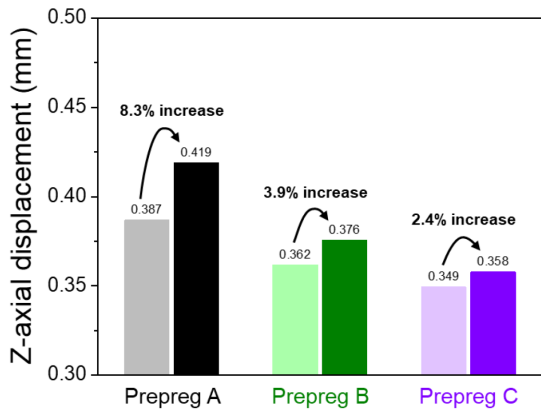


Fig. 5. Warpage of PCB before and after 100 thermal cycles for 3 different types of prepreg.

와 같았다.

앞서 응력 완화 시험을 통해 계산된 온도에 따른 각 prepreg 원자재의 shift factor는 Fig. 6과 같다. Prepreg A의 경우, 나머지 2개 종류의 prepreg와 비교하여 더욱 큰 shift factor를 가지는 것을 확인할 수 있다. 큰 shift factor는 응력 완화 현상에 있어, 고온 환경하에서 동일한 크기의 modulus로 감소하는 데 걸리는 시간이 짧아 빠른 응력 완화가 발생하는 것을 의미한다. 응력 완화 현상은 재료의 점성 특성에 기인한 현상이므로, 큰 shift factor를 가지는 재료는 점성과 탄성 특성 중 점성 특성이 우세한 재료라고 말할 수 있다. Prepreg A의 경우, 큰 shift factor를 지녀 고온 환경하에서 점성 특성이 우세하고 이에 따라 더욱 빠른 응력 완화 현상이 발생하게 되어 나머지 2개 종류의 prepreg에 비하여 더욱 큰 warpage가 발견되는 것이다.

Fig. 7은 각 prepreg 원자재별로 초기 modulus 값을 기준으로 정규화한 응력 완화 곡선을 나타낸 그림이다. 100번의 열 사이클은 그 길이가 240,000 sec이며, 해당 시점에서의 정규화된 modulus는 Fig. 8과 같다. 240,000 sec 기준으로 prepreg B 및 prepreg C의 정규화된 modulus는 각

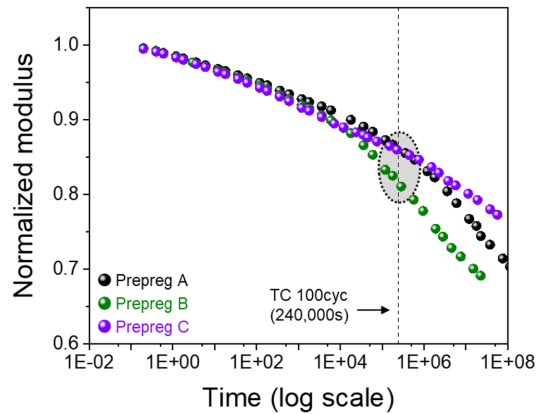


Fig. 7. Normalized modulus relaxation curve for 3 different types of prepreg.

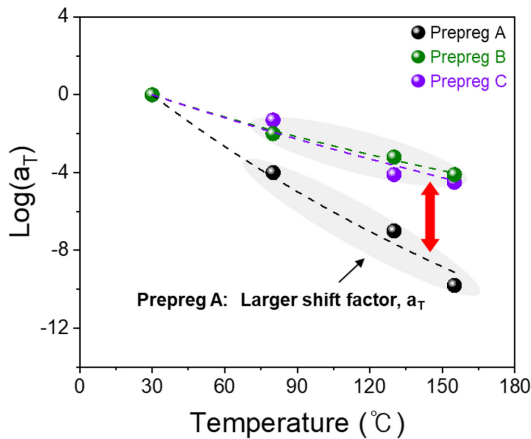


Fig. 6. Shift factor for 3 different types of prepreg.

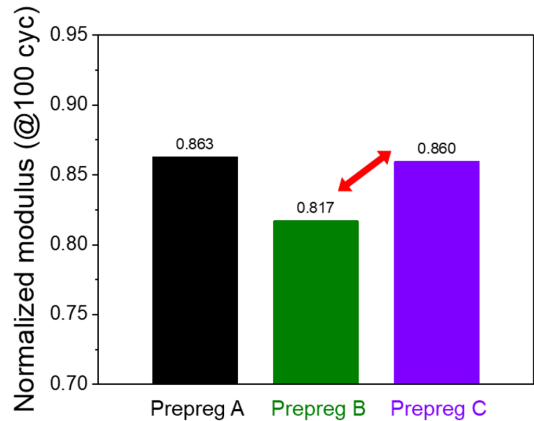


Fig. 8. Normalized modulus of 3 different types of prepreg at 240,000 sec, which is equivalent to 100 thermal cycles.

각 0.817, 0.860이다. 상대적으로 작은 정규화된 modulus를 지닌 prepreg B의 경우, 동일한 시간 동안 빠른 응력 완화의 발생으로 인하여 modulus의 감소가 더욱 많이 발생하였을 것이며, 이 경우 재료의 점성 특성이 상대적으로 우세하다고 할 수 있다. 반면 상대적으로 큰 정규화된 modulus를 지닌 prepreg C는 시간에 따른 응력 완화의 발생이 상대적으로 더딘, 탄성 특성이 상대적으로 더욱 우세한 재료라고 할 수 있다. 따라서 탄성 특성이 우세하여 응력 완화의 발생이 덜한 prepreg C가 prepreg B보다 더욱 warpage 발현이 적으며 기계적 신뢰성이 우수하다.

결론적으로 온도에 따른 재료의 거동 관점과 시간에 따른 재료의 거동 관점에서 warpage 발현을 최소화할 수 있는 기계적 신뢰성이 우수한 prepreg의 경우, 작은 shift factor 및 큰 정규화된 modulus를 지녀야 할 것이다. 온도 및 시간에 따른 재료의 응력 완화 현상을 최소화하기 위하여 앞서 언급한 조건들이 충족되어야 할 것이며, 이는 결국 재료의 탄성 특성이 점성 특성보다 더욱 우세해야 함을 의미한다. 따라서 우수한 기계적 신뢰성의 PCB 설계를 위하여 탄성 특성이 우세한 prepreg의 개발 및 선정이 이루어져야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 prepreg의 점탄성 특성에 따라 발생하는 PCB의 time-dependent warpage 거동에 대해 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 이를 위해 prepreg에 대한 응력 완화 시험을 진행하여 정량적으로 평가한 점탄성 물성을 시뮬레이션 모델에 대입하여 활용하였다. Prepreg의 점탄성 물성 대입 여부에 따른 PCB warpage 시뮬레이션 결과를 비교함으로써, prepreg의 점탄성 특성이 추가적인 PCB warpage를 야기할 수 있음을 확인하였다.

또한 각기 다른 3개 종류의 prepreg 원자재에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 warpage 발현이 가장 적고 기계적 신뢰성이 우수한 prepreg 원자재를 선정할 수 있었으며, 그 이유를 앞서 측정된 prepreg의 점탄성 물성과 연관지어 설명하였다. Prepreg C의 물성을 대입한 시뮬레이션의 결과가 가장 적은 PCB warpage를 보였으며, 이는 prepreg C가 가장 응력 완화 현상이 덜 발생하는 탄성 특성이 우세한 재료이기 때문이다. 따라서 기계적으로 강건한 PCB 설계를 위해서는 점성 특성이 덜한, 우세한 탄성 특성을 지니는 prepreg가 요구되며, 구체적으로는 보다 작은 shift factor 및 큰 정규화된 modulus를 가져야 할 것이다.

#### 감사의 글

This research was supported by a Semiconductor Industry Collaborative Project between Korea Advanced Institute of Science and Technology and Samsung Electronics Co. Ltd. (No. IO230411-05865-01).

#### References

1. K. Kim, Y. Hwangbo and S.-H. Choa, "Warpage and Solder Joint Strength of Stacked PCB using an Interposer", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 30(3), 40-50 (2023).
2. S. Cho, Y. T. Kim and Y. B. Ko, "A Study on Robust Design of PCB for Package on Package by Numerical Analysis with Unit and Substrate Level to Reduce Warpage", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 28(4), 31-39 (2021).
3. C. Kim, H. Choi, M. S. Kim and T.-S. Kim, "Packaging Substrate Bending Prediction due to Residual Stress", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(1), 21-26 (2013).
4. J. Kim, C.-Y. Gu and T.-S. Kim, "Thermal Warpage Behavior of Single-Side Polished Silicon Wafers", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 27(3), 89-93 (2020).
5. C. Kim, T. I. Lee, M. S. Kim and T. S. Kim, "Warpage Analysis of Electroplated Cu Films on Fiber-Reinforced Polymer Packaging Substrates", *Polymers*, 7(6), 985 (2014).
6. P. Y. Lin and S. Lee, "Warpage Modeling of Ultra-Thin Packages Based on Chemical Shrinkage and Cure-Dependent Viscoelasticity of Molded Underfill", *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 20(1), 67 (2019).
7. J. B. Pyo, T. I. Lee, C. Kim, M. S. Kim and T. S. Kim, "Prediction of Time-Dependent Swelling of Flexible Polymer Substrates Using Hygro-Mechanical Finite Element Simulations", *Soft matter*, 12(18), 4135-4141 (2016).
8. T. I. Lee, C. Kim, J. B. Pyo, M. S. Kim and T. S. Kim, "Effect of Anisotropic Thermo-Elastic Properties of Woven-Fabric Laminates on Diagonal Warpage of Thin Package Substrates", *Composites Structures*, 176, 973-981 (2017).
9. H.-S. Kim and H.-S. Kim, "Development of Warpage Simulation Method according to Thermal Stress based on Equivalent Anisotropic Viscoelastic Model", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 29(3), 43-48 (2022).
10. D. -H. Kim, S. -J. Joo, D. -O. Kwak and H. -S. Kim, "Anisotropic viscoelastic shell modeling technique of copper patterns/photoimageable solder resist composite for warpage simulation of multi-layer printed circuit boards", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(10), 105016 (2015).
11. M. L. Williams, R. F. Landel and J. D. Ferry, "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids", *Journal of the American Chemical Society*, 77(14), 3701-3707 (1955).
12. C. Kim, T.-I. Lee, M. S. Kim and T.-S. Kim, "Mechanism of warpage orientation rotation due to viscoelastic polymer substrates during thermal processing", *Microelectronics Reliability*, 73, 136-145 (2017).