

## 등가 이방성 점탄성 모델 기반 열 응력에 따른 휨 해석 기법 개발

김현수<sup>1</sup> · 김학성<sup>1,2,†</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 융합기계공학과

<sup>2</sup>한양대학교 나노과학기술연구소

### Development of Warpage Simulation Method according to Thermal Stress based on Equivalent Anisotropic Viscoelastic Model

Heon-Su Kim<sup>1</sup> and Hak-Sung Kim<sup>1,2,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

<sup>2</sup>Institute of Nanoscience and Technology, Hanyang University, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

(Received September 8, 2022: Revised September 28, 2022: Accepted September 30, 2022)

**초 록:** 본 연구에서는 재료의 이방성 점탄성 거동을 고려한 해석 기법을 개발하여 휨(Warpage) 해석의 정확성을 개선하고자 하였다. 먼저, 이방성 점탄성 거동 구현을 위해 구리 패턴(Cu trace) 및 범프(Bump)가 존재하는 패키지를 모델링 하였다. 복잡한 형상의 범프 영역은 대표체적요소 모델을 기반으로 등가 이방성 점탄성 물성 및 열 팽창계수를 도출하였다. 도출된 물성을 기반으로 패키지에 0~125도의 열 주기(Thermal cycle)를 가하였으며, 열 주기에 따른 패키지의 휨 경향을 확인하였다. 해석 결과의 검증을 위해 해석 모델과 동일한 패키지를 제작하였고, 섀도우 모아레 간섭계(Shadow Moire interferometer)를 통해 열 주기에 따른 실제 패키지의 휨 정도를 측정하였다. 결과적으로 구리 패턴, 범프 등의 요소가 고려된 등가 이방성 점탄성 해석 기법의 적용으로 5  $\mu\text{m}$  이내의 오차로 패키지의 휨 정도를 계산하고 휨의 형태를 예측할 수 있었다.

**Abstract:** In this study, simulation method was developed to improve the accuracy of the warpage simulation based on the equivalent anisotropic viscoelastic model. First, a package with copper traces and bumps was modeled to implement anisotropic viscoelastic behavior. Then, equivalent anisotropic viscoelastic properties and thermal expansion coefficient for the bump region were derived through the representative volume element model. A thermal cycle of 0 to 125 degrees was applied to the package based on the derived mechanical properties, and the warpage according to the thermal cycle was simulated. To verify the simulation results, the actual package was manufactured, and the warpage with respect to the thermal cycle was measured through shadow moiré interferometer. As a result, by applying the equivalent anisotropic viscoelastic model, it was possible to calculate the warpage of the package within 5  $\mu\text{m}$  error and predict the shape of the warpage.

**Keywords:** Package, Warpage, Anisotropic viscoelastic property, Representative volume element model, Finite element method

## 1. 서 론

반도체 산업이 급속도로 발전함에 따라, 점점 더 고성능의 제품이 요구되고 있다. 소자 단위에서도 집적도를 높이기 위한 연구 개발이 활발히 진행되고 있지만, 연구 개발 속도의 한계로 인하여 최근에는 패키지 단위에서의 소형화 및 고집적화를 통한 고성능의 제품 개발 방식이 각광받고 있다. 실제로 기존 와이어 본딩을 대체한 플립

칩(Flip chip) 형태의 패키지 개발을 시작으로<sup>1)</sup>, 범프, TSV(Through silicon via), 재배선층(Redistribution layer) 등의 구조를 적용하여 다수의 칩을 나열하거나 쌓아 올려 집적도를 증가시킨 2.5D, 3D 구조의 칩단 패키지 제품들이 개발되고 있다.<sup>2,3)</sup> 고난이도의 공정 적용에 따라, 제품의 신뢰성에 직결되는 패키지의 온도별 휨 정도를 평가하는 것 또한 중요한 요소로 작용하며,<sup>4,5)</sup> 효율적으로 패키지의 휨을 예측하기 위해 유한요소 해석 틀이 많이

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: kima@hanyang.ac.kr

© 2022, 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.

사용되고 있다.<sup>6,7)</sup>

일반적으로, 제품 개발시에는 해석 효율을 위해 패키지의 구조를 단순화한 뒤, 각 구조를 등방성 물질로 가정하여 해석을 진행한다.<sup>8,9)</sup> 이는 단순한 구조의 패키지에서는 적합성이 높지만, 구리 배선, 범프 등의 복잡한 구조 및 다양한 재료들이 패키지에 적용됨에 해당 방식의 적합성은 떨어지게 된다. 또한, 패키지를 구성하는 에폭시 성형 컴파운드(Epoxy molding compound) 및 기판(Substrate)은 시간에 따라 응력 완화 현상이 나타나는 점탄성 거동을 보이기에, 복잡한 구조에서 발생하는 이방성 점탄성 물성을 고려할 수 있는 새로운 해석 기법이 요구되고 있다.<sup>10)</sup>

본 연구에서는 등가 이방성 점탄성 모델 기반의 해석 기법을 개발하여 열 응력에 따른 패키지 휨 해석 적합성을 개선하고자 하였다. 먼저, 이방성 점탄성 거동 구현을 위해 패키지 기판의 구리 배선 및 범프를 전부 모델링 하였다. 이때, 작고 복잡한 형상을 가지는 범프의 경우 해석 효율을 위해 3개의 대표 모델을 선정하여 별도로 모델링 하였고, 대표체적요소 모델을 기반으로 각 모델별 등가 이방성 점탄성 물성 및 열 팽창 계수를 도출하였다. 이후, 제품이 사용되면서 생기는 발열 또는 주변의 환경으로 인한 온도 변화에 따른 영향을 평가하기 위하여,

0~125도의 열 주기에 따른 휨 해석을 진행하였으며, 등가 이방성 점탄성 물성 적용 유무에 따른 해석 결과를 비교 하였다. 최종적으로 해석 결과의 검증은 위해 웨도우 모 아래 간섭계를 통해 실제 패키지 휨 정도를 측정하였고 해석 결과와 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 패키지 시편 모델링

Fig. 1(a)와 같이 내부 구리 배선 및 범프가 존재하는 플립칩 형태의 패키지 시편을 제작하였다. 하단에는 구리 배선 및 범프로 이루어진 기판, 상단에는 실리콘 칩이 있으며, 칩과 기판을 연결하는 재배선층이 중간에 배치된다. 또한, 칩 주위는 에폭시 성형 컴파운드로 패키징 되어 있다. 전체 패키지의 가로, 너비는 5.4 mm이며, 에폭시 성형 컴파운드의 두께는 0.7 mm, 칩의 두께는 0.26 mm, 재배선층의 두께는 0.02 mm, 기판의 두께는 0.2 mm이다. 메쉬는 tetrahedron 형상의 메쉬로 설정하였으며, 두께 방향으로 최소 2개 이상의 요소(Element)가 존재하도록 사이즈를 설정하였다.

해당 형상을 모델링 할 때에는 먼저 해석 효율을 위해

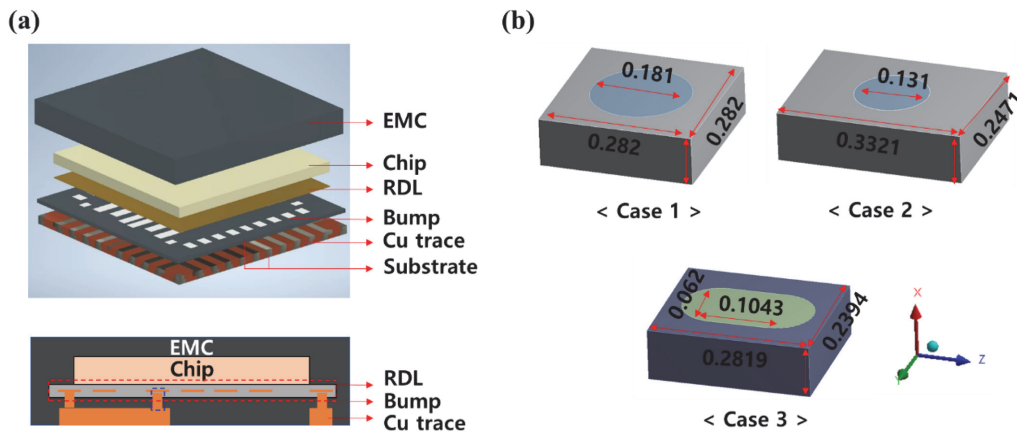


Fig. 1. (a) 플립칩 패키지 시편 구조 및 (b) 대표체적요소 모델을 위한 범프 대표 모델.

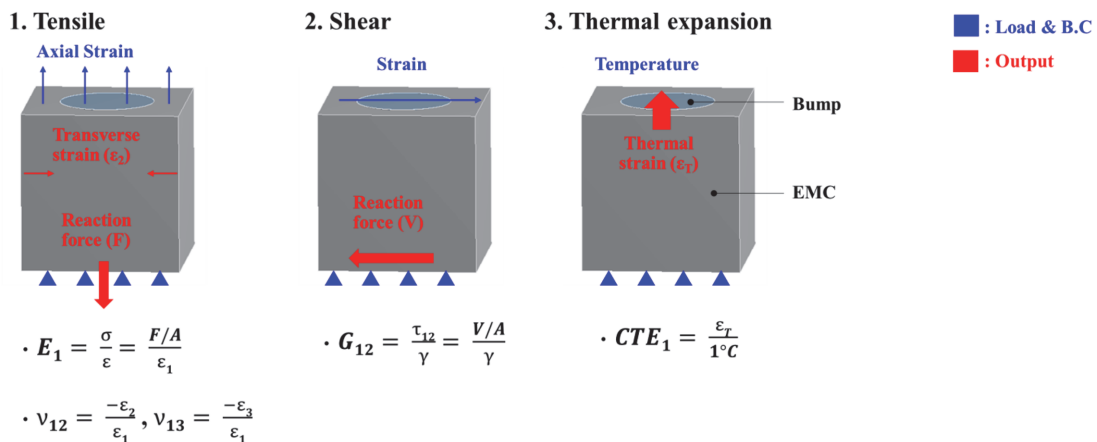


Fig. 2. 대표 모델의 기계적/열적 물성 도출을 위한 인장, 전단, 열팽창 해석 개략도.

대칭(Symmetric) 조건을 적용하였다. 패키지 층별 모델링 시 하단 기판의 구리 배선은 전부 디자인하였지만, 범프의 경우 크기가 작고 형상이 달라 그대로 모델링 할 경우 메쉬가 비효율적으로 많이 생성된다. 따라서 해석 효율을 위해 대표 체적 모델을 이용하여 범프 영역을 모델링하였다.<sup>11)</sup> 이때, 제품 내에 이루어져 있는 범프 사이즈 및 형상은 총 3가지로 구분된다. 따라서, 이를 대표하는 3개의 모델을 선정하였으며, 그 형상은 Fig. 1(b)와 같다. 또한, 대표 모델의 기계적/열적 물성을 도출하기 위하여 Fig. 2와 같이 x, y, z 방향별로 인장, 전단, 열 팽창 해석을 진행하였다.

2.2. 열 주기에 따른 휨 해석

패키지에 온도 변화가 발생하면, 구조별 열 팽창계수 차이로 인해 내부에 열 응력이 가해지게 된다. 따라서, 상용 유한요소 해석 툴(Ansys mechanical 2019 R2, Ansys Inc.)을 통해 패키지의 열 응력에 따른 패키지의 휨 정도를 예측하고자 하였다. 열 응력 해석을 위해서 재료의 온도별 modulus, 열 팽창계수를 물성표로 사용하였다.<sup>10,12)</sup> 이때, 에폭시 성형 컴파운드 및 기판은 고분자 물질로, 일정한 응력이 가해지면 시간에 따라 응력이 감소하는 수식 1과 같은 점탄성 거동을 가진다.<sup>10)</sup>

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i e^{-(t/\rho_i)} \tag{1}$$

$t$ 는 시간,  $E_{\infty}$ 는 long-term modulus,  $E_i$ 는 Prony series 계수,  $\rho_i$ 는 relaxation time을 나타낸다. 하지만, 시간에 따른 물성 측정 실험을 상온에서만 진행하는 것은 시간이 많이 소요된다. 따라서, 대부분의 경우 온도가 높아질수록 점탄성 거동이 빠르게 발생하는 점을 이용해, 온도 구간을 달리하여 가속 실험을 진행한다.<sup>13)</sup> 이때, 온도와 시간에 따른 관계를 나타내는 shift factor는 수식 2의 Williams-Landel-Ferry (WLF) 수식으로 표현된다.

$$\log a_T = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)} \tag{2}$$

$c_1, c_2$ 는 재료별 상수이며,  $T_0$ 는 기준 온도이다. Shift

factor인  $a_T$ 는 하기 수식 3으로 표현될 수 있다.

$$a_T = \frac{\rho(T)}{\rho(T_0)} \tag{3}$$

이를 기반으로, 온도를 시간으로 변환한 뒤, 응력 완화 실험 데이터에서의 modulus 구간들을 연결하여 시간에 따른 modulus 곡선을 도출한다. 해당 곡선을 수식 1을 통해 비선형 피팅하여 Prony series 계수 도출이 가능하며, 이때의 온도, 시간의 관계를 통해서 WLF 계수 도출이 가능하다. 에폭시 성형 컴파운드 및 기판은 Prony series 계수 및 WLF 계수를 추가적으로 적용하여 시간에 따른 점탄성 거동을 물성표에 반영하였다.<sup>10)</sup> 또한, 패키지 내의 기판은 구리 배선 및 범프로 인해 이방성 점탄성 거동을 나타내며 이는 수식 4의 ABD 강성 행렬로 표현된다.<sup>10)</sup>

$$ABD(t) = \begin{bmatrix} A_{11}(t) & A_{12}(t) & A_{16}(t) & B_{11}(t) & B_{12}(t) & B_{16}(t) \\ A_{21}(t) & A_{22}(t) & A_{26}(t) & B_{21}(t) & B_{22}(t) & B_{26}(t) \\ A_{61}(t) & A_{62}(t) & A_{66}(t) & B_{61}(t) & B_{62}(t) & B_{66}(t) \\ B_{11}(t) & B_{12}(t) & B_{16}(t) & D_{11}(t) & D_{12}(t) & D_{16}(t) \\ B_{21}(t) & B_{22}(t) & B_{26}(t) & D_{21}(t) & D_{22}(t) & D_{26}(t) \\ B_{61}(t) & B_{62}(t) & B_{66}(t) & D_{61}(t) & D_{62}(t) & D_{66}(t) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$[A], [B], [D]$  행렬은 각각 in-plane stiffness, stretching-bending coupling 그리고 bending stiffness 행렬을 나타낸다. 이방성 점탄성 거동 반응을 위해 구리 배선은 전부 모델링하였으며, 범프의 경우 해석 효율 개선을 위해 범프가 포함된 3개의 대표 모델에 대한 등가 이방성 점탄성 물성을 도출하였다 (Fig. 2). 이때, 범프는 탄성 물성을 가지므로, 시간에 따른 점탄성 거동을 나타내는 WLF 계수 및 Prony series 계수에 영향을 주지 않는다.<sup>10,14)</sup> 따라서 WLF 계수 및 Prony series 계수는 기판의 계수와 동일하다 가정하였다.

열 응력을 가하기 위하여, Fig. 3(a)와 같이 실제 패키지 사용 환경에 가까운 0도에서 125도 범위의 열 주기를 반복적으로 가하였다. 또한 실제 열 주기 실험 상황을 모사하기 위하여 Fig. 3(b)와 같이 시편 전체에 중력 가속도를 고려해 주었으며, 구속 조건으로는 대칭면에 frictionless support

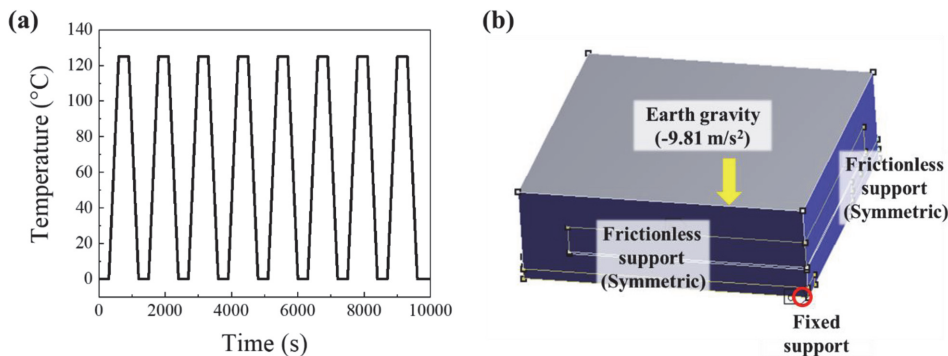


Fig. 3. 열 응력에 따른 휨 해석을 위한 (a) 열 주기 및 (b) 초기조건, 구속조건.



조건을 주었으며, 대칭 기준축 하단은 고정하였다.<sup>15)</sup>

해석 모델을 기관 모델링 방법에 따라 Case 1과 Case 2로 구분하여, Case 1의 경우에는 기관층을 하나의 등방성 점탄성 물성으로 적용하였고, Case 2의 경우에는 기관층에 구리 배선, 범프가 추가로 고려된 이방성 점탄성 물성을 적용하였다. 각각의 케이스에 따른 휨 해석 결과를 비교하였으며, 휨 수치는 패키지의 중심부 높이 대비 최외각의 높이 차를 계산하여 추출하였다. 최종적으로, 휨 해석 결과의 정합성을 검증하기 위하여 섀도우 모아레 간섭계를 통해 실제 패키지의 휨 정도를 측정하였다.<sup>16)</sup>

### 3. 결과 및 고찰

열 주기에 따른 휨 해석 결과는 Fig. 4와 같다. 기관을 하나의 등방성 점탄성 물성으로 적용한 Case 1의 경우 휨 경향이 열 주기에 따라 점점 감소하였으며, 이방성 점탄성 물성을 적용한 Case 2의 경우 열 주기에 따라서 휨 경향이 일정하게 증가하였다 (Fig. 4(a), 4(b)). 이는 내부 패턴과 범프 구조들이 휨에 영향을 주기 때문이다. 열 주기에 따른 변형률 및 응력 결과는 Fig. 4(c)-(f)와 같으며, 시간에 따라서 변형률 및 응력이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이는 패키지를 이루고 있는 에폭시 성형 컴파운드 및 기관의 점탄성 물성으로 인한 응력 완화 현상 때문

이며<sup>10)</sup>, 점탄성 거동이 해석 내에 정상적으로 반영되었음을 확인할 수 있었다.

이방성 점탄성 물성 고려 유무에 따른 해석 결과를 비교하였을 때, 이방성 점탄성 물성을 고려하지 않은 Case 1의 경우, 휨 값이 -1.53~1.28  $\mu\text{m}$ 의 범위로 거의 발생하지 않는 것을 확인하였다 (Fig. 4(a)). 하지만 이방성 점탄성 물성을 고려한 Case 2의 경우, 휨 값이 2.48~6.20  $\mu\text{m}$ 의 범위로 Case 1과의 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 휨의 형상 또한 Case 1의 경우에는 특정 형상이 확인되지 않았지만, Case 2의 경우에는 스마일 형태의 형상이 뚜렷한 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 4(b)).

변형률에서의 차이도 확인할 수 있으며, Case 1의 평균 변형률이 Case 2보다 높게 나타남을 확인하였다 (Fig. 4(c)). 반면, 두 Case에서의 전반적인 응력은 거의 일정한 것을 확인할 수 있다 (Fig. 4(e)). Case 2에서는 열 응력이 구리 배선 및 범프에 고르게 분포되지만, Case 1에서는 구리 배선 및 범프가 고려되지 않아 열 응력이 내부 칩에 집중적으로 가해지는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 변형률 및 휨 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 4(d), (f)). 이와 같이 변형률 및 응력은 구리 배선, 범프, 칩 등의 내부 파손을 예측하는 데에 중요한 지표이기 때문에 이방성 점탄성 고려 유무에 따른 휨 해석 결과를 검증하여 해석 정합성을 확인할 필요가 있다.

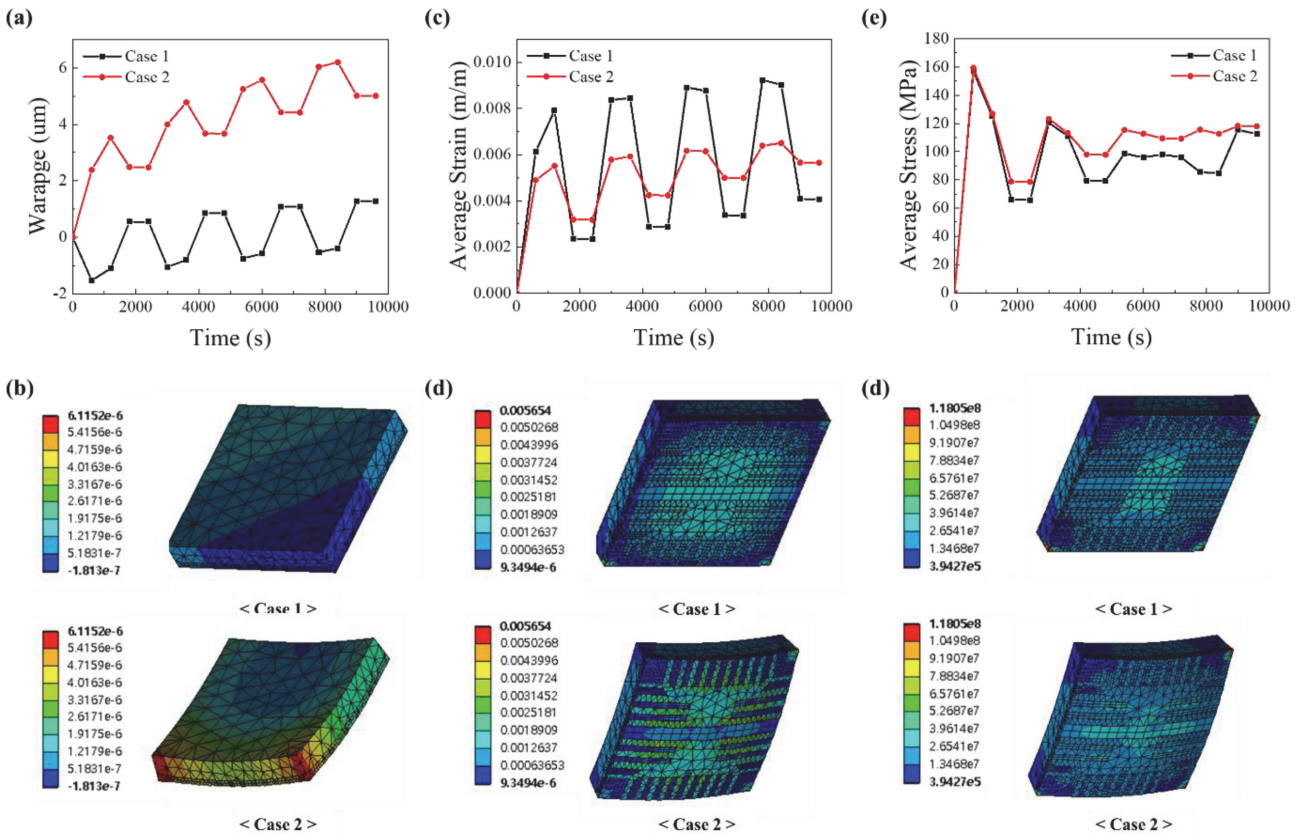


Fig. 4. 등방성 점탄성 물성 (Case 1) 및 이방성 점탄성 물성 (Case2) 적용에 따른 열 주기별 해석 결과(a) 열 주기별 휨, (b) 휨 현상, (c) 열 주기별 변형률, (d) 변형률 분포, (e) 열 주기별 응력, (f) 응력 분포.

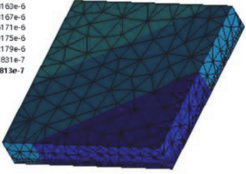
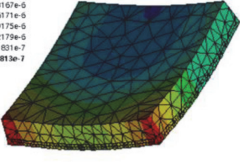
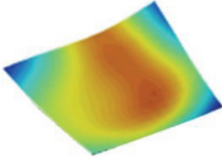
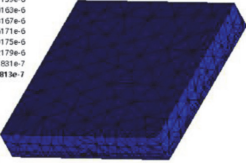
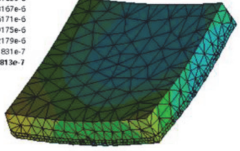
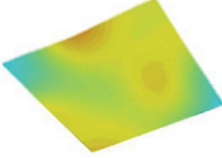
	Simulation		Experiment
	Case 1	Case 2	
<b>Max. Warpage</b>	 <p>1.28 um</p>	 <p>6.20 um</p>	 <p>11.85 um</p>
<b>Min. Warpage</b>	 <p>-1.53 um</p>	 <p>2.48 um</p>	 <p>6.30 um</p>

Fig. 5. 휨 해석 결과 및 웨도우 모아레 간섭계를 통한 휨 측정 결과 비교.

해석 결과의 검증을 위해 웨도우 모아레 간섭계로 실제 패키지의 열 주기에 따른 휨 정도를 측정하였고, Fig. 5와 같이 결과를 비교하였다. 비교를 위해 해석을 통해서 열 주기 동안 패키지가 최대로 휘 경우(Max. Warpage)와 최소로 휘 경우(Min. Warpage)에서의 휨 분포 및 휨 값을 추출하였다. 모아레 간섭계로 측정한 패키지의 휨 값은 6.30~11.85  $\mu\text{m}$ 의 범위로 측정되었으며, Case 2의 결과와 약 5  $\mu\text{m}$ 의 오차가 있음을 확인하였다. 휨의 형상은 스마일 형태로 Case 2와 비슷한 경향임을 확인할 수 있었다. 결과적으로 Case 2와 같이 이방성 점탄성 물성을 고려하여야 휨 해석의 정합성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 등가 이방성 점탄성 모델이 적용된 휨 해석 기법을 개발하여 휨 해석의 정합성을 개선하였다. 이방성 점탄성 거동 구현을 위해 패키지 기관의 구리 배선 및 범프를 전부 모델링 하였으며, 범프 영역은 해석 효율을 위해 3개의 대표 모델로 모델링하여 각 모델에 대한 등가 이방성 점탄성 물성 및 열 팽창계수를 도출하였다. 0~125도의 열 주기에 따른 패키지의 휨 해석을 진행한 결과, 이방성 점탄성 모델이 적용되지 않는 모델에서는 휨이 거의 발생하지 않고 열 변형률이 높게 계산되었다. 반면 이방성 점탄성 모델이 고려되면 스마일 형태의 휨 형상이 발생하였고, 열 변형률이 상대적으로 낮게 계산되었다. 해석 결과의 검증을 위해 웨도우 모아레 간섭계를 통해 열 주기에 따른 실제 패키지의 휨 정도를 측정하였고, 이방성 점탄성 모델을 고려했을 때, 5  $\mu\text{m}$  이내의 오차로 휨 정도 및 형상을 예측할 수 있는 것을 확인하였다. 개발된 해석 기법은 복잡한 형상을 가지는 첨단 패키

지들의 신뢰성을 예측하기 위한 방법으로 활용될 수 있으며, 더 나아가 패키지 내부 구리 배선 및 범프 등에서의 응력, 변형률 분포를 통해 패키지 내부 구조의 취약 영역을 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government(MOTIE)(20202020800360, Innovative Energy Remodeling Total Technologies(M&V, Design, Package Solutions, and Testing & Verifications Technologies) for the Aging Public Buildings). This research was also supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MEST) (2021M2E6A1084690).

#### References

1. Y. Wang, X. Dai, G. Liu, Y. Wu, Y. Li, and S. Jones, "Status and Trend of Power Semiconductor Module Packaging for Electric Vehicles", Modeling and Simulation for Electric Vehicle Applications, M. A. Fakhfakh, InTech, 2016, <https://www.intechopen.com/chapters/51578>
2. J. U. Knickerbocker, P. S. Andry, E. Colgan, B. Dang, T. Dickson, X. Gu, C. Haymes, C. Jahnes, Y. Liu, J. Maria, R. J. Polastre, C. K. Tsang, L. Turlapati, B. C. Webb, L. Wiggins, and S. L. Wright, "2.5 D and 3D technology challenges and test vehicle demonstrations", 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference, IEEE, 12906710 (2012).
3. J. Lau, P. Tzeng, C. Lee, C. Zhan, M. Li, J. Cline, K. Saito,

- Y. Hsin, P. Chang, Y. Chang, J. Chen, S. Chen, C. Wu, H. Chang, C. Chien, C. Lin, T. Ku, R. Lo, and M. Kao, "Redistribution layers (RDLs) for 2.5 D/3D IC integration", International Symposium on Microelectronics, 2013(1), 000434-000441 (2013).
4. C. O'Mahony, O. Olszewski, R. Hill, R. Houlihan, C. Ryan, K. Rodgers, C. Kelleher, R. Duane, and M. Hill, "Reliability assessment of MEMS switches for space applications: laboratory and launch testing", Journal of Micromechanics and Microengineering, 24(12), 125009 (2014).
  5. P. B. Hassell, "Advanced warpage characterization: location and type of displacement can be equally as important as magnitude", The Proceedings of Pan Pacific Microelectronics Symposium Conference (2001).
  6. B. J. Aleck, "Thermal stresses in a rectangular plate clamped along an edge", 16(2), 118-122 (1949).
  7. M. Lee and I. Jasiuk, "Asymptotic expansions for the thermal stresses in bonded semi-infinite bimaterial strips", Journal of Electronic Packaging, 113(2), 173-177 (1991).
  8. Y. Q. Wang, K. H. Low, F. X. Che, H. L. J. Pang, and S. P. Yeo, "Modeling and simulation of printed circuit board drop test", Proceedings of the 5th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2003), IEEE, 7914998 (2003).
  9. J. Wu, R. R. Zhang, S. Radons, X. Long, and K. K. Stevens, "Vibration analysis of medical devices with a calibrated FEA model", Computers & Structures, 80(12), 1081-1086 (2002).
  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, 5(10), 105016 (2015).
  11. C. T. Sun and R. S. Vaidya, "Prediction of composite properties from a representative volume element", Composites Science and Technology, 56(2), 171-179 (1996).
  12. S. -J. Joo, B. Park, D. -H. Kim, D. -O. Kwak, I. -S. Song, J. Park, and H. -S. Kim, "Investigation of multilayer printed circuit board (PCB) film warpage using viscoelastic properties measured by a vibration test", Journal of Micromechanics and Microengineering, 25(3), 035021 (2015).
  13. E. Catsiff and A. V. Tobolsky, "Stress-relaxation of polyisobutylene in the transition region (1, 2)", Journal of Colloid Science, 10(4), 375-392 (1955).
  14. K. Kwok and S. Pellegrino, "Micromechanical modeling of deployment and shape recovery of thin-walled viscoelastic composite space structures", 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (2012).
  15. P. B. Lin, C. -T. Ko, W. -T. Ho, C. -H. Kuo, K. -W. Chen, Y. -H. Chen, and T. -J. Tseng, "A comprehensive study on stress and warpage by design, simulation and fabrication of RDL-first panel level fan-out technology for advanced package", 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, 17083079 (2017).
  16. H. Ding, R. E. Powell, C. R. Hanna, and I. C. Ume, "Warpage measurement comparison using shadow moiré and projection moiré methods", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 25(4), 714-721 (2002).