Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 21, No. 1 pp. 8-13, 2020

https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.1.8
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

박막 패턴에 의한 기판의 응력 거동

남명우*, 홍순관
혜전대학교 전기과

Stress Behavior of Substrate by Thin Film Pattern

Myung Woo Nam*, Soon Kwan Hong
Department of Electrical Engineering, Hyejeon College

요 약 IC 패키지와 같이 두께가 수백 마이크로미터 정도로 매우 얇은 기판에서 뒤틀림 불량을 일으키는 가장 큰 원인은 응력이다. 일반적으로 응력은 기판 위에 서로 다른 물질을 적층할 때, 결정구조 및 그에 따른 열팽창 계수의 차이로 인해 발생한다. 본 연구에서는 사각형의 박막 패턴이 적층된 기판에 발생하는 응력의 거동을 수치적으로 분석하였다. 먼저 기판 변위를 구하고, 이를 이용하여 기판 변형률과 응력을 구하였다. 박막 패턴의 가장자리에 인장력이 집중된 경우, 박막 패턴의 가장자리를 중심으로 수직 응력과 전단 응력이 발생한다. 수직 응력은 박막 패턴의 가장자리와 꼭짓점 부근에 발생한다. 전단 응력도 박막 패턴의 가장자리를 중심으로 발생하나 수직 응력과는 달리 꼭짓점 부근에는 나타나지 않는다. 또한 가장자리를 중심으로 전단 응력의 크기와 방향이 바뀌는 것을 확인할 수 있었다. 박막패턴 가장자리 힘이 동일할 때, 수직 응력은 전단 응력에 비해 10배 정도의 값을 나타내었다. 이는 뒤틀림 불량을 일으키는 가장 큰 원인이 수직 응력임을 나타낸다.

Abstract Stress is the main cause of warpage failure of very thin substrates with thickness of several hundred μm, such as IC packages. Stress usually results from differences in crystal structures and corresponding thermal expansion coefficients when depositing different substances on a substrate. In this study, the behaviors of stress occurring in substrates were numerically analyzed by the thin-film pattern of the rectangles stacked on the substrates. First, the substrate displacement was obtained and the substrate strain and stress were obtained using it. When the tensile force is concentrated at the edge of the thin film pattern, normal and shear stressesare generated around the edge of the thin film pattern. Normal stress occurs near the edges of the thin film pattern and the vertexes. Shear stress also occurs around the edge of the thin film pattern, but unlike normal stress, it does not appear near the vertexes. It was also confirmed that the magnitude and direction of shear stress are changed around the edge. When edge forces of thin-film pattern are equal, the normal stress was about 10 times larger than the shear stress. This indicates that normal stress is the biggest cause of warpage failure.

Keywords : Warpage, Tensile Force, Normal Stress, Shear Stress, IC Package

1. 서론

전자기기의 경박단소화를 위해 수동 및 능동부품들을 IC화하고 이를 BGA(Ball Grid Array)와 같은 패키지로 만들어 PCB 기판에 실장하는 방식이 많이 사용된다 [1,2]. IC 패키지의 기판 소재로는 FR-4와 BT 레진과 같은 열경화성 수지들이 주로 사용되며, 그 두께는 얇은 경우 수백 [㎛]에 불과하다. 두께가 얇은 기판은 전자기기의

*Corresponding Author : Myung-Woo Nam(Hyejeon College)
email: mwnam@hj.ac.kr
Received October 29, 2019 Revised November 18, 2019
Accepted January 3, 2020 Published January 31, 2020

경박단소화에 도움이 되지만, 신뢰성이나 내구성 면에서는 약점이 된다. 특히 문제가 되는 것은 완성된 IC 패키지에 발생하는 기판 뒤틀림(warpage)이다[3-5]. IC 패키지에는 반도체 칩과 기판을 전기적으로 연결하기 위한 Cu 배선, 사각형의 패드, 솔더 레지스트(solder resist) 패턴 등이 형성되어 있다. 이와 같은 이질적인 소재들이 IC 패키지 기판에 적층되면, 물질의 결정구조 차이 및 그에 따른 열팽창 계수(Coefficient of Thermal Expansion ; CTE) 차이로 인해 응력(stress)이 발생된다. 이 응력은 기판의 뒤틀림 불량을 일으키는 가장 큰 원인이다[6]. 응력이 발생된 IC 패키지를 PCB 기판에 실장하면 PCB 기판에 응력이 전달되어 결국 PCB 기판에도 뒤틀림 불량이 발생된다. 본 논문에서는 기판의 뒤틀림 불량을 줄이는데 활용될 수 있도록 탄성론에 기초하여 기판의 응력 거동을 분석하였다.

2. 본론

2.1 박막 패턴에 의한 기판 변위

기판의 응력 거동을 살펴보기 위해 Fig. 1과 같이 기판 위에 사각형의 박막 패턴이 적층된 구조를 가정하였다. 이때 기판은 탄성률이 일정하고 박막 패턴에 비해 크기가 매우 큰 것으로 가정한다. 기판과 박막 패턴은 서로 다른 물질이므로 인장력(tensile force) 또는 압축력(compressive force)이 생긴다. 인장력이나 압축력은 박막 패턴의 가장자리(edge)에 집중되며, 박막의 두께에 비례한다. 이러한 힘에 의해 기판에는 변위(displacement)가 발생한다[7].

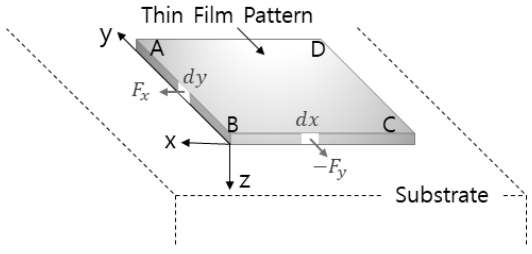

Fig. 1. Rectangular thin film pattern deposited on substrate

본 연구에서는 기판 위에 적층된 박막 패턴이 인장력을 가진 것으로 가정하였다. 그러면 박막 패턴의 가장자리는 Fig.1의 F_x와 같이 바깥쪽으로 향하는 힘을 나타내게 된다.

이러한 조건에서 x 방향의 기판 변위 u와 y 방향의 기판 변위 v는 각각 식(1)과 (2)로 주어진다[8,9].

$$u = A\{[\frac{xz}{r^3} - \frac{(1-2\nu)x}{r(r+z)}]F_z + \frac{2(1-\nu)r+z}{r(r+z)}F_x + \frac{[2r(\nu r+z)+z^2]x}{r^3(r+z)^2}(xF_x+yF_y)\} \quad (1)$$

$$v = A\{[\frac{yz}{r^3} - \frac{(1-2\nu)y}{r(r+z)}]F_z + \frac{2(1-\nu)r+z}{r(r+z)}F_y + \frac{[2r(\nu r+z)+z^2]y}{r^3(r+z)^2}(xF_x+yF_y)\} \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 $r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$ 이고, $A=\frac{1+\nu}{2\pi E}$ 이다. υ는 푸아송의 비(Poisson's ratio)를 나타내며, E는 Young's Modulus이다.

박막 패턴의 가장자리에 작용하는 인장력을 'S'라 하면, x 방향의 힘이 작용하는 가장자리 AB의 미소길이 dy에 작용하는 힘 $F_x = Sdy$가 된다. 이를 식 (1)에 적용하면 dy에 생기는 x 방향 기판 변위 du_{AB}를 구할 수 있고, 이로부터 식 (3)의 u_{AB}를 구할 수 있다.

$$du_{AB} = A[\frac{2(1-\nu)r+z}{r(r+z)} + \frac{[2r(\nu r+z)+z^2]x^2}{r^3(r+z)^2}]Sdy$$

$$u_{AB} = AS\int[\frac{2(1-\nu)r+z}{r(r+z)} + \frac{[2r(\nu r+z)+z^2]x^2}{r^3(r+z)^2}]dy \quad (3)$$

가장자리 BC에는 -y 방향의 힘이 작용하므로 미소길이 dx에 작용하는 힘 $-F_y = Sdx$가 된다. 이를 식 (1)에 적용하면 dx에 생기는 기판 변위 du_{BC}를 구할 수 있으며, 이로부터 식 (4)의 u_{BC}를 구할 수 있다.

$$du_{BC} = -A[\frac{[2r(\nu r+z)+z^2]xy}{r^3(r+z)^2}]Sdx$$

$$u_{BC} = -AS\int[\frac{[2r(\nu r+z)+z^2]xy}{r^3(r+z)^2}]dx \quad (4)$$

가장자리 CD에는 -x 방향의 힘이 작용하므로 기판 변위 u_{CD}는 식 (3)과 크기는 같고 방향이 반대이다. 마찬가지로 기판 변위 u_{DA}는 식 (4)와 크기는 같고 방향이

반대이다.

위와 마찬가지로 식 (2)로부터 가장자리 AB와 BC에 의한 y 방향의 기판 변위 v_{AB}와 v_{BC}를 구할 수 있으며, 이를 식 (5), (6)으로 나타내었다.

$$v_{AB} = AS\int [\frac{[2r(\nu r+z)+z^2]xy}{r^3(r+z)^2}]dy \qquad (5)$$

$$v_{BC} = -AS\int [\frac{2(1-\nu)r+z}{r(r+z)}+\frac{[2r(\nu r+z)+z^2]y^2}{r^3(r+z)^2}]dx \qquad (6)$$

가장자리 CD에 의한 y 방향의 기판 변위 v_{CD}는 식 (5)와 크기는 같고 방향이 반대이다. 마찬가지로 가장자리 DA에 의한 y 방향의 변위 v_{DA}는 식 (6)과 크기는 같고 방향이 반대이다.

2.2 기판 변위의 발생

Fig. 2는 가장자리 AB를 중심으로 살펴본 x 방향의 기판 변위 u_{AB}이다. 'Thin Film Pattern'으로 표시한 쪽이 박막 패턴이 적층된 부분이다. 또한 그림에서 밝게 보이는 부분이 기판 변위 u_{AB}의 값이 큰 부분이다. 그림에서 가장자리 AB를 중심으로 u_{AB}가 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 가장자리 AB에 x 방향 인장력 F_x가 집중적으로 작용하기 때문이다.

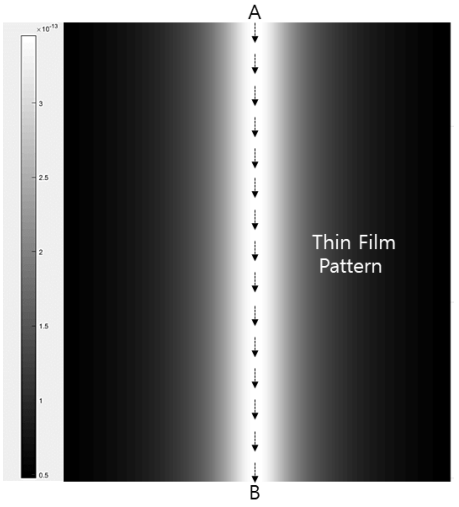

Fig. 2. Displacement u_{AB} of substrate around the edge AB

Fig. 3은 가장자리 AB를 기준으로 살펴본 기판 변위 u_{AB}이다. 그림에서 화살표는 가장자리 AB를 나타내며, 그래프의 왼쪽이 박막 패턴이 적층된 부분이다. u_{AB}는 가장자리 AB에서 가장 큰 값을 나타내며, 가장자리를 중심으로 대칭적인 크기 변화를 보인다.

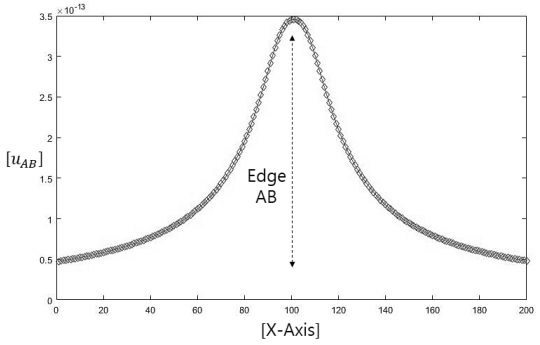

Fig. 3. Variation of u_{AB} by x direction at the edge AB

Fig. 4는 가장자리 BC를 중심으로 살펴본 기판 변위 u_{BC}이다. 가장자리 BC를 중심으로 박막 패턴의 바깥쪽은 밝게 보이는 부분이 나타나고, 안쪽은 더 검은 부분이 나타난다. 이는 가장자리 BC를 중심으로 기판 변위가 발생하는 한편 그 방향도 달라지고 있음을 나타낸다.

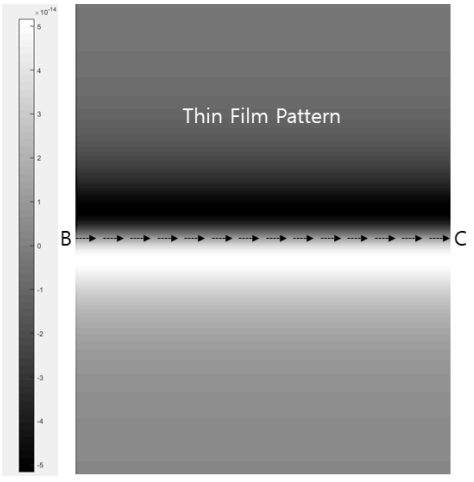

Fig. 4. Displacement u_{BC} of substrate around the edge BC

Fig. 5는 y 방향에 따른 u_{BC}의 변화이다. u_{BC}는 가장자리 BC를 중심으로, 박막 패턴이 적층된 부분(그래프 왼쪽)은 (+) 값을 나타내고, 박막 패턴이 없는 부분은 (-) 값을 나타낸다. 이는 Fig. 4에서 확인한 바와 같이 박막 패턴의 안쪽과 바깥쪽에서 기판 변위의 방향이 달라짐을 의미한다.

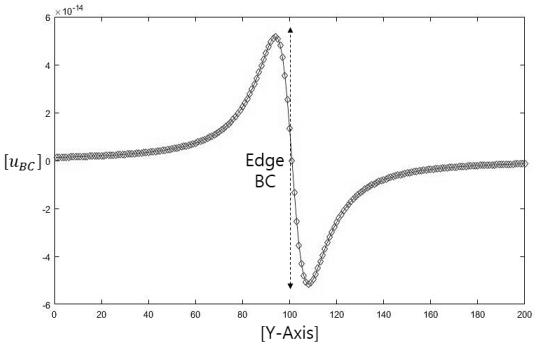

Fig. 5. Variation of u_{BC} by y direction at the edge AB

Fig. 5와 같은 결과는 가장자리 BC의 힘 $-F_y$가 x 방향의 기판 변위인 u_{BC}와 방향이 다르기 때문이다. 즉 박막 패턴의 유무에 따라 기판 변위의 크기와 방향이 달라지는 것이다.

Fig. 6은 박막 패턴의 가장자리 AB와 BC에 대하여 기판 변위 u_{AB}와 u_{BC}를 합하여 나타낸 그림이다. 가장자리 AB 쪽이 밝게 보이는 영역이 더 넓으며, 이는 가장자리 AB를 중심으로 더 큰 기판 변위가 발생되기 때문이다. 또한 Fig. 6에 흰색 화살표로 표시한 꼭짓점(vertex) B 부근에도 밝게 보이는 영역이 관찰되며, 이는 이 지점에서 u_{AB}와 u_{BC}가 중첩되면서 기판 변위가 커지기 때문이다. Fig. 6의 해석 결과는 박막 패턴의 가장자리를 따라 기판 변위가 발생하고, 그 크기가 위치에 따라 매우 불균일함을 보여준다.

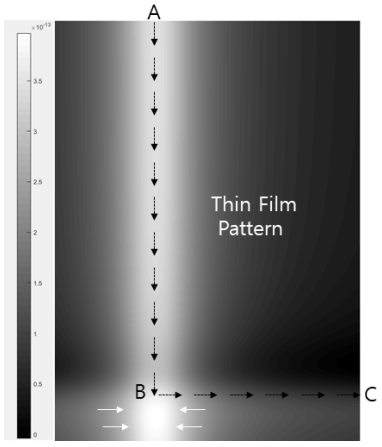

Fig. 6. Displacement of substrate around the edge AB and BC

가장자리 CD와 DA는 가장자리 AB 및 BC와 방향만이 다르기 때문에 동일한 결과를 나타낸다. 또한 y 방향의 기판 변위인 v_{AB}, v_{BC}, v_{CD}, v_{DA}는 Fig. 1에 보인 박막 패턴을 90° 회전시킨 것과 같으므로 결국 가장자리 AB 및 BC와 같은 결과를 나타낸다.

2.3 기판 변형률과 응력

위에서 구한 기판 변위를 이용하여 기판의 수직 변형률(normal strain)과 전단 변형률(shear strain)을 구하였다. Fig. 7은 가장자리 AB와 BC를 기준으로 살펴본 기판의 수직 변형률 ϵ_{xx}이다. 변형률의 크기는 등고선으로 표시하였다. ϵ_{xx}는 꼭짓점 B를 중심으로 큰 값을 나타내는데, 이는 Fig. 6에 보인 것과 같이 꼭짓점 B 부근의 기판 변위가 크기 때문이다.

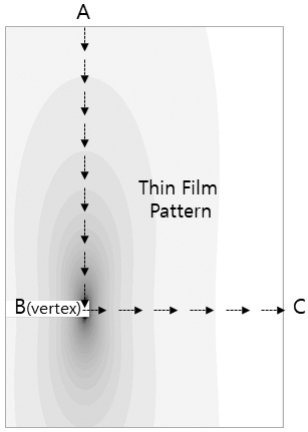

Fig. 7. Normal strain ϵ_{xx} of substrate around the edge AB and BC

Fig. 8은 박막 패턴의 가장자리 AB와 BC를 기준으로 살펴본 전단 변형률 Υ_{xy}이다. Υ_{xy}는 박막 패턴의 가장자리에 집중되어 큰 값을 보여준다. 반면에 꼭짓점 B 부근으로부터 왼쪽 사선 방향으로 멀리 떨어진 영역까지는 상대적으로 작은 값을 나타낸다.

위에서 구한 변형률을 이용하여 기판에 생기는 수직 응력(normal stress)과 전단 응력(shear stress)을 구하였다. Fig. 9는 박막 패턴의 가장자리 AB와 BC를 기준으로 살펴본 수직 응력 σ_{xx}이다. 그림에서 응력의 크기를 등고선으로 표시하였으며, 꼭짓점 B 부근에서 큰 수직 응력이 나타난다.

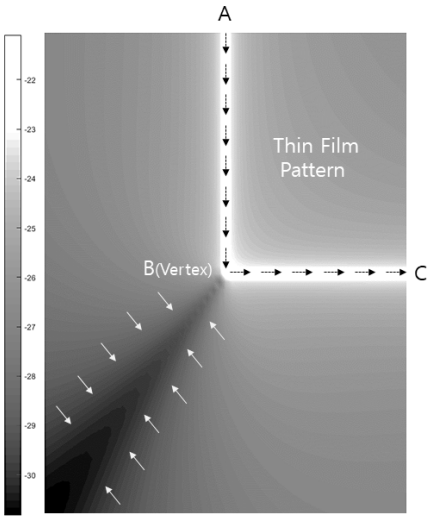

Fig. 8. Shear strain Υ_{xy} of substrate around the edge AB and BC

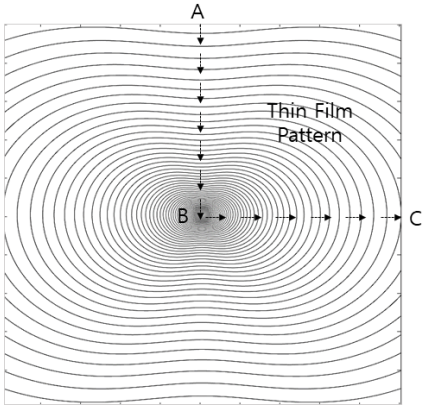

Fig. 9. Normal stress σ_{xx} of substrate around the edge AB and BC

Fig. 10은 가장자리 AB를 중심으로 x 방향으로 살펴본 σ_{xx}의 변화이다. σ_{xx}는 가장자리에서 가장 큰 값을 나타내며, 가장자리를 중심으로 대칭적인 분포를 나타낸다. Fig. 11은 박막 패턴의 가장자리 AB와 BC를 기준으로 살펴본 기판의 전단 응력 τ_{xy}의 변화이다. 수직 응력과 마찬가지로 전단 응력의 크기도 등고선으로 표시하였다. τ_{xy}는 가장자리를 중심으로 넓은 영역에 나타나며, σ_{xx}와 달리 꼭짓점 B 부근에 응력이 집중되지 않는다. 이는 Fig. 8에서 보인 꼭짓점 B 부근에서 작은 값을 나타낸 전단 변형률 Υ_{xy}와 관련이 있다.

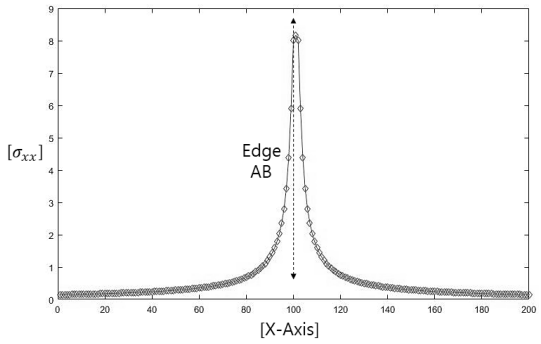

Fig. 10. Variation of σ_{xx} by x direction at the edge AB

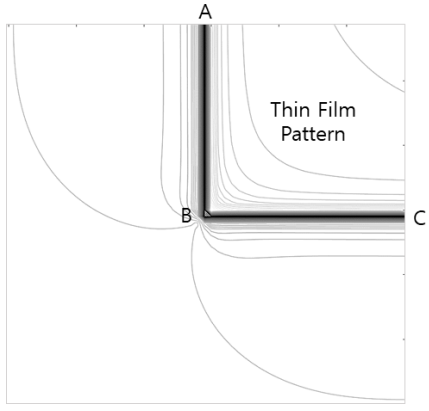

Fig. 11. Shear stress τ_{xy} of substrate around the edge AB and BC

Fig. 12는 가장자리 AB에서 x 방향으로 살펴본 전단 응력 τ_{xy}의 변화이다. τ_{xy}는 박막 패턴의 안쪽(그래프 왼쪽)에서는 그 값이 작고, 바깥쪽에서 최댓값을 나타낸다. 또한 응력의 방향도 가장자리를 중심으로 바뀌고 있다.

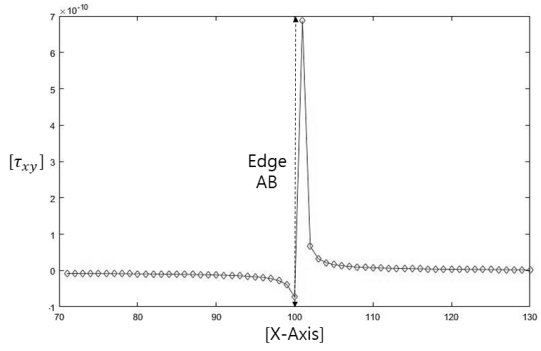

Fig. 12. Variation of τ_{xy} by x direction at the edge AB

위에서 보인 가장자리 AB와 BC에 대한 변형률과 응력의 해석 결과는 가장자리 CD와 DA에서도 동일하게 나타난다.

Fig 9 내지 Fig 12에서 수직 응력 σ_{xx}는 가장자리를 중심으로 대칭적으로 분포하고, 전단 응력 τ_{xy}는 가장자리 바깥쪽에서 최댓값을 나타낸다. 이러한 결과는 기판의 뒤틀림을 줄이는데 활용될 수 있다. 예컨대 박막패턴의 가장자리를 얇게 가공하여 가장자리에 집중되는 힘을 줄이는 방법, 뒤틀림 방향에 따라 수직 및 전단 응력의 정도를 분석하고, 박막패턴의 형태를 변경하는 등의 대응이 가능하다.

3. 결론

기판 위에 적층된 사각형의 박막 패턴에 의해 기판에 발생되는 응력의 거동을 분석하였다. 그 결과, 박막 패턴의 가장자리를 중심으로 수직 응력이 발생하고, 특히 꼭짓점 부근에 더 큰 수직 응력이 발생함을 확인하였다. 전단 응력의 경우에는 수직 응력과 비슷하게 박막 패턴의 가장자리를 중심으로 응력이 발생하였으나 수직 응력과는 달리 꼭짓점 부근에 응력이 집중되지 않았다. 또한 전단 응력은 박막 패턴의 바깥쪽에서 응력의 최댓값이 관찰되었고, 가장자리를 중심으로 응력의 방향이 바뀌는 것을 확인하였다.

References

[1] Cheng Hsiang Liu, Jyun Ling Tsai, Hung Hsien Chang, Chang Lun Lu, Shih Ching Chen, " Integrated Process Characterization and Fabrication Challenges for 2.5D IC Packaging Utilizing Silicon Interposer with Backside Via Reveal Process", *Proceedings of 2014 Electronic Components&Technology Conference*, pp.1628-1634, May 2014.
DOI: https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897513

[2] John H. Lau, "Recent Advances and New Trends in Flip Chip Technology", *J. Electronic Package*, Vol.138, Issue3, Sep 2016.
DOI: https://doi.org/10.1115/1.4034037

[3] W. Lin, "A Feasible Method to Predict Thin Package Actual Warpage Based on an FEM Model Integrated with Empirical Data", *Proceedings of IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference*, May 2015.
DOI: https://doi.org/10.1109/ECTC.2015.7159874

[4] SeonMo Gu, Billy Ahn, MyoungSu Chae, Seng Guan Chow, Gwang Kim and Eric Ouyang, "Impact of Copper Densities of Substrate Layers on the Warpage of IC Packages", *Journal of the Microelectronics & Packaging Society*, Vol.20, No.4, pp.59-63. 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.6117/kmeps.2013.20.4.059

[5] Y. Sawada, K. Harada, H. Fujioka, "Study of Package Warp Behavior for High Performance Flip-Chip BGA", *Microelectronics Reliability*, Vol.43, Issue.3, pp.465-471, March 2003.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714(02)00294-9

[6] Cha Gyu Song, Sung-Hoon Choa, "Numerical Study of Warpage and Stress for the Ultra Thin Package", *Journal of the Microelectronics & Packaging Society*, Vol.17, No.4, pp.49-60, 2010.

[7] Soon kwan Hong, "An Analysis of the Substrate Displacement by the Thin Film Pattern", *Proceedings of KAIS(The Korea Academical-Industrial cooperation Society) Autumn Conference*, pp.154-156, Dec. 2015.

[8] L. D. Landau, E. M. Lifshitz, "Theory of Elasticity", Pergamon Press, 3rd Edition, Chap1, 1976.

[9] S. Timoshenko, J. N. Goodier, "Theory of Elasticity", McGraw-HILL Book Company, 2nd Edition, Chap1, 1951.

남 명 우(Myung-Woo Nam) [종신회원]

- 1994년 2월 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(공학석사)
- 2001년 8월 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 혜전대학교 전기과 교수

〈관심분야〉
반도체 소자, 디지털신호처리, 마이크로프로세서

홍 순 관(Soon-Kwan Hong) [종신회원]

- 1989년 2월 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(공학석사)
- 1994년 8월 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(공학박사)
- 1994년 8월 ~ 현재 : 혜전대학교 전기과 교수

〈관심분야〉
반도체 소자, 전기기판(PCB)