

## 유한요소 해석을 통해 온도와 상대습도에 따른 수분 흡습 및 탈습을 반영한 반도체 패키지 구조의 박리 예측

엄희진<sup>1</sup> · 황연택<sup>1</sup> · 김학성<sup>1,2,†</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 융합기계공학과

<sup>2</sup>한양대학교 나노과학기술연구소

### Delamination Prediction of Semiconductor Packages through Finite Element Analysis Reflecting Moisture Absorption and Desorption according to the Temperature and Relative Humidity

Hui-Jin Um<sup>1</sup>, Yeon-Taek Hwang<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:** 최근 반도체 패키지 구조는 점점 더 얇아지고 복잡해지고 있다. 두께가 얇아짐에 이중 계면에서 물성차이에 의한 박리는 심화될 수 있으며 따라서 계면의 신뢰성이 패키징 설계에 중요한 요소라 할 수 있다. 특히, 반도체 패키징에 많이 사용되는 폴리머는 온도와 수분에 영향을 크게 받기 때문에 환경에 따른 물성 변화 고려가 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 온도조건에서 수분의 흡습과 탈습을 모두 고려한 패키지 구조의 계면 박리 예측을 유한 요소 해석을 통해 수행하였다. 확산계수와 포화 수분 함량과 같은 재료의 물성은 흡습 실험을 통해 확보하였으며, 흡습 이후 TMA와 TGA를 통하여 각 재료의 수분 팽창 계수를 확보하였다. 각 계면의 접합 강도 평가를 위해 수분의 영향을 고려하여 다양한 온도 조건에서 마이크로 진단 실험을 수행하였다. 이러한 물성을 바탕으로 온도와 수분에 의해 발생하는 변형을 모두 고려한 패키지 박리 예측 해석을 수행하였으며, 결과적으로 리플로우 공정 동안의 실시간 수분 탈습 거동을 고려한 계면 박리 예측을 성공적으로 수행하였다.

**Abstract:** Recently, the semiconductor package structures are becoming thinner and more complex. As the thickness decrease, interfacial delamination due to material mismatch can be further maximized, so the reliability of interface is a critical issue in industry field. Especially, the polymers, which are widely used in semiconductor packaging, are significantly affected by the temperature and moisture. Therefore, in this study, the delamination prediction at the interface of package structure was performed through finite element analysis considering the moisture absorption and desorption under the various temperature conditions. The material properties such as diffusivity and saturated moisture content were obtained from moisture absorption test. The hygro-swelling coefficients of each material were analyzed through TMA and TGA after the moisture absorption. The micro-shear test was conducted to evaluate the adhesion strength of each interface at various temperatures considering the moisture effect. The finite element analysis of interfacial delamination was performed that considers both deformation due to temperature and moisture absorption. Consequently, the interfacial delamination was successfully predicted in consideration of the in-situ moisture desorption and temperature behavior during the reflow process.

**Keywords:** Semiconductor package, hygroscopic thermal behavior, interfacial delamination, adhesion reliability

## 1. 서 론

전자 패키징은 마이크로 일렉트로닉스 장치의 급속한 성장으로 인해 엔지니어링 분야에서 상당한 주목을 받고

있다. 집적 회로(IC) 장치의 고밀도화 기술 추세가 증가함에 따라 이중 재료 및 복잡한 열-기계적 상호 작용이 발생하는 계면의 수가 증가했다. 패키지의 고집적 시스템은 서로 다른 특성을 가진 다양한 재료의 얇은 층으로

<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.

구성된다.<sup>1,2)</sup> 서로 다른 재료 사이의 계면은 탄성계수, 열 팽창 계수(CTE) 및 흡습 팽창과 같은 열 기계적 특성의 불일치로 인한 불완전한 접합 및 응력 집중의 결과로 IC 에서 취약한 부분이다. 따라서 계면 박리는 전자 장치의 주요 파손 중 하나로 산업에서 주요한 이슈이다. 반도체 패키지 재료는 리플로우 공정과 같은 제조 과정 중에 수분-열-기계적 거동과 관련된 복잡한 환경의 영향을 받을 수 있으며, 이러한 리플로우 공정 동안 이종 재료 사이의 계면에서 수분 탈습이 계면 박리를 더 쉽게 유발한다.<sup>3-6)</sup>

IC 패키지의 계면 박리에 초점을 맞춘 여러 연구가 수행되었으며, 이러한 IC 패키지의 박리를 예측하기 위해 몇 가지 이종 재료 계면 박리 이론이 실험적 및 수치적으로 연구되었다.<sup>7,8)</sup> 그러나 얇은 Si 칩의 취성 특성으로 인해 기존에 사용되던 peel, lap shear 와 같은 실험 방식은 적용이 어려우며 Chip 과 얇은 필름 접착층 간의 계면물성 측정을 위해 개발된 파괴 인성 실험의 경우에도 주로 상온에서만 진행되었다.<sup>7,9)</sup> 따라서, 칩/에폭시 몰딩 컴파운드(EMC) 및 칩/인쇄 회로 기판(PCB)과 같은 계면에서 실험적인 접합 강도 데이터가 부족한 실정이며, 더욱이, 고온에서의 흡습-열-기계적 거동을 고려하여 다중 재료로 구성된 패키지의 정확한 계면 특성을 측정하는 것은 매우 어려운 문제이다.

본 연구에서는 수분에 의한 박리를 예측하기 위해 다양한 실험을 통해 확산계수, 포화 수분 함량, 접합 강도 등의 재료 특성을 평가하였다. EMC, PCB, die attach film (DAF)와 같은 각 패키지 재료에 대해 상대 습도(RH) 및 온도 조건에 대한 흡습 실험을 수행했다. 이후 25°C에서 250°C까지의 온도 조건과 수분 흡수 시간에 대한 마이크로

스케일 진단 시험을 통해 이종재료(EMC/Chip, Chip/PCB, PCB/EMC)의 계면 접합 강도를 측정하였다. 확보한 재료별 물성 데이터를 바탕으로, 흡습성과 열변형의 복합 효과를 해석하기 위한 서브루틴 기반 유한요소해석 코드가 개발되었고, 리플로우 과정에서 발생하는 수분 탈습과 온도 상승을 고려한 계면 박리를 성공적으로 예측하였다.

## 2. 실험방법

패키지 구조에 사용되는 각 재료의 확산 계수와 포화 수분 함량에 대한 물성 확보를 위하여 흡습 실험을 수행하였다. 흡습 실험 전 시편 내 수분 제거를 위하여 120°C 온도 조건에서 24시간 건조를 진행하였으며, 항온 흡습기 (S-TH31, SC ENG Co Ltd.)를 이용하여 세 가지 조건 (85°C/RH85%, 60°C/RH60%, 30°C/RH70%)에서 흡습에 따른 각 재료의 무게 증가를 측정하였다. 해당 조건은 수분/리플로우 민감도 분류를 위한 J-STD-020 표준실험을 바탕으로 선정하였으며, EMC, PCB, 그리고 DAF 총 세 종류의 시편에 대해 흡습 실험을 진행하였다. Fick's second law에 기반하여 재료 내 흡습 분포를 분석하였으며, 박판 특성을 고려하여 최종적으로 확산 계수는 아래 수식을 통하여 도출하였다.<sup>10-12)</sup>

$$\sqrt{D} = \left( \frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right) \frac{h\sqrt{\pi}}{4M_{sat}}, \quad t_2 > t_1, \frac{M_2}{M_{sat}} < 0.6$$

여기서,  $t_1$  과  $t_2$  는 흡습 실험 수행을 통해 확보한 수분 함량 커브에서 초기 선형 구간에서의 두 시간 포인트를

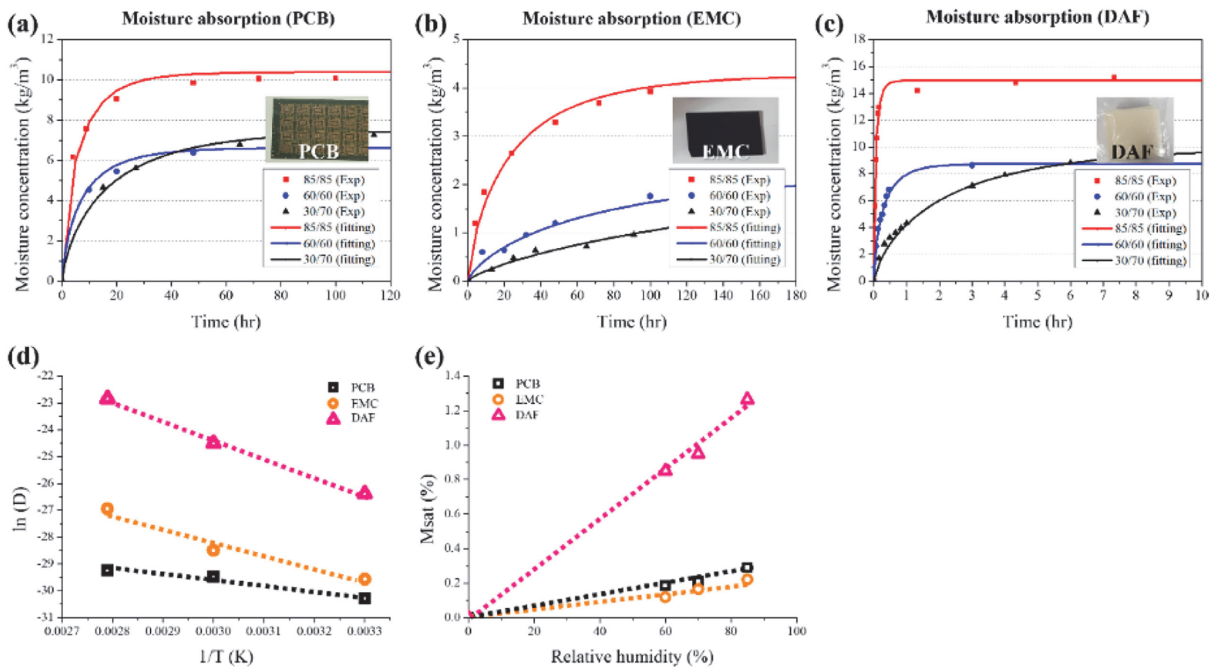
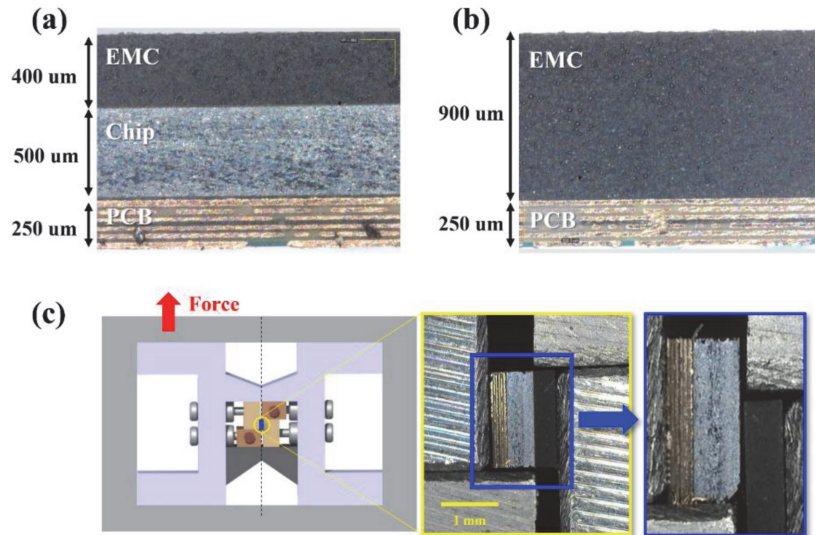


Fig. 1. Moisture absorption test result according to the package materials: (a) Printed circuit board (PCB), (b) Epoxy molding compound (EMC), and (c) Die attach film (DAF). (d) The relationship between the temperature and moisture diffusivity according to the package materials. (e) The relationship between the saturated moisture content and relative humidity according to the package materials.



**Fig. 2.** The optical image of interfacial adhesion test specimen in thickness direction for (a) case1(EMC-Chip) and case2 (Chip-PCB), and (b)case3 (EMC-PCB). (c) Schematic image of micro-shear test jig and the optical image of specimen before and after the test.

의미하며,  $M_1$  과  $M_2$  는 이에 해당하는 수분 함량을 의미한다.  $M_{sat}$  은 시편의 포화 수분 함량을 의미한다. 시편 종류(PCB, EMC, DAF)에 대해 진행한 흡습 실험 결과가 Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 1(a-c) 에 시간에 따른 수분 흡습량 그래프가 나타나 있으며, 이를 바탕으로 각 재료별 온도-확산계수 관계(Fig. 1(d)) 및 상대 습도-포화 수분 함량 관계(Fig. 1(e))를 도출하였다.

각 재료별로 흡습에 따른 팽창 특성을 보기 위하여 TGA(SDT Q600, TA Inst.) 와 TMA(TMA6100, SEIKO Inst.)를 진행하였다.<sup>13,14</sup> 동일한 포화 흡습 상태의 시편을 이용하여 85℃ 등온 조건에서 TMA 와 TGA 를 수행하였으며, 이 결과를 통해 수분 함량에 따른 변형률을 나타내는 수분 팽창 계수 (CME)를 도출하였다.

패키지 계면의 접합 강도 측정을 위하여 마이크로 전단 실험을 수행하였다. 전단 실험에 사용된 시편 크기는 가로 8 mm 세로 2 mm, 그리고 두께 1.15 mm이며, 광학 현미경으로 시편 두께방향으로 계면을 촬영한 결과가 Fig. 2에 나타나 있다. 이 때, Chip-PCB 계면에는(Fig. 2(a)) 접합을 위해 약 20 μm 두께의 DAF 층이 존재한다. 본 연구에서는 계면 접합 강도 실험 진행 시 다음과 같이 Case1: EMC-Chip 계면, Case2: Chip-PCB 계면, 그리고 Case3: EMC-PCB 계면, 총 세 가지 계면에 대해 진행하였다. 접합 강도 실험 수행 이전에 85℃/RH85% 조건에서 시간에 따른 (0시간, 48시간, 150시간) 흡습 실험을 수행하였다. 또한, 흡습 정도가 다른 각 시편에 대해 25℃, 100℃, 200℃ 세 가지 온도 조건에 대해 전단 실험을 진행하였다.

### 3. 유한요소해석

흡습 및 탈습에 대한 해석 수행을 위하여 EMC, Si-Chip, DAF 그리고 PCB 으로 구성된 PKG 구조를 Fig. 4(a-b) 와

같이 모델링하였다. 3차원 solid 요소를 이용하였으며, DC3D8은 질량 확산 모델에, C3D8R 은 열-기계 해석 모델에 사용되었다. 외부의 수분에 의해 PKG 구조내 재료 흡습 과정 및 리플로우 동안 탈습되는 거동을 해석하기 위하여 PKG 의 경계조건은 85℃/RH85% 과 250℃/RH0% 로 각각 부여되었다. 패키지 각 재료별로 다른 포화 수분 함량을 가지고 있기 때문에 계면에서의 흡습도는 불연속적으로 나타난다. 따라서 각 재료의 경계면에서 이러한 불연속성을 해결하기 위하여 정규화된 흡습도를 적용하였다 [15]. 흡습 및 탈습 해석을 통해 확보된 수분 흡습도는 field variable (FV)에 저장되었으며, 이 FV 은 추후 열-기계 유한요소 해석에 사용되었다.

흡습/탈습을 고려한 열-기계 유한요소 해석은 Abaqus 6.14-1 프로그램의 UMAT(user material subroutine) 코드를 이용하여 구축되었다. 앞서 설명했듯이 흡습 해석으로부터 온도 변화 및 흡습도 데이터를 추출하여 열-기계 해석 모델에 input 으로 사용하였다. 또한, 접합 강도 실험으로부터 확보한 온도 및 흡습도에 따른 접합 강도는 계면 박리 예측을 위하여 초기 손상 강도로써 각 계면 물성으로 적용되었다.

### 4. 결과 및 고찰

온도에 따른 각 재료 계면의 접합 강도가 Fig. 3에 나타나 있다. 모든 계면에서 온도와 흡습도가 높아질수록 계면 강도는 감소하였으며, 특히 EMC의 경우 유리전이온도인 130℃ 보다 높은 온도에서 계면 강도가 급격히 저하되었다. DAF 의 경우 유리전이온도가 50℃이며, 이에 100℃ 온도 조건에서 절반 이하의 매우 낮은 접합 강도 값을 보였다. 유한요소 해석 수행 시 계면 강도에 있어 온도와 흡습도의 영향을 보다 정확하게 반영하기 위하여 확

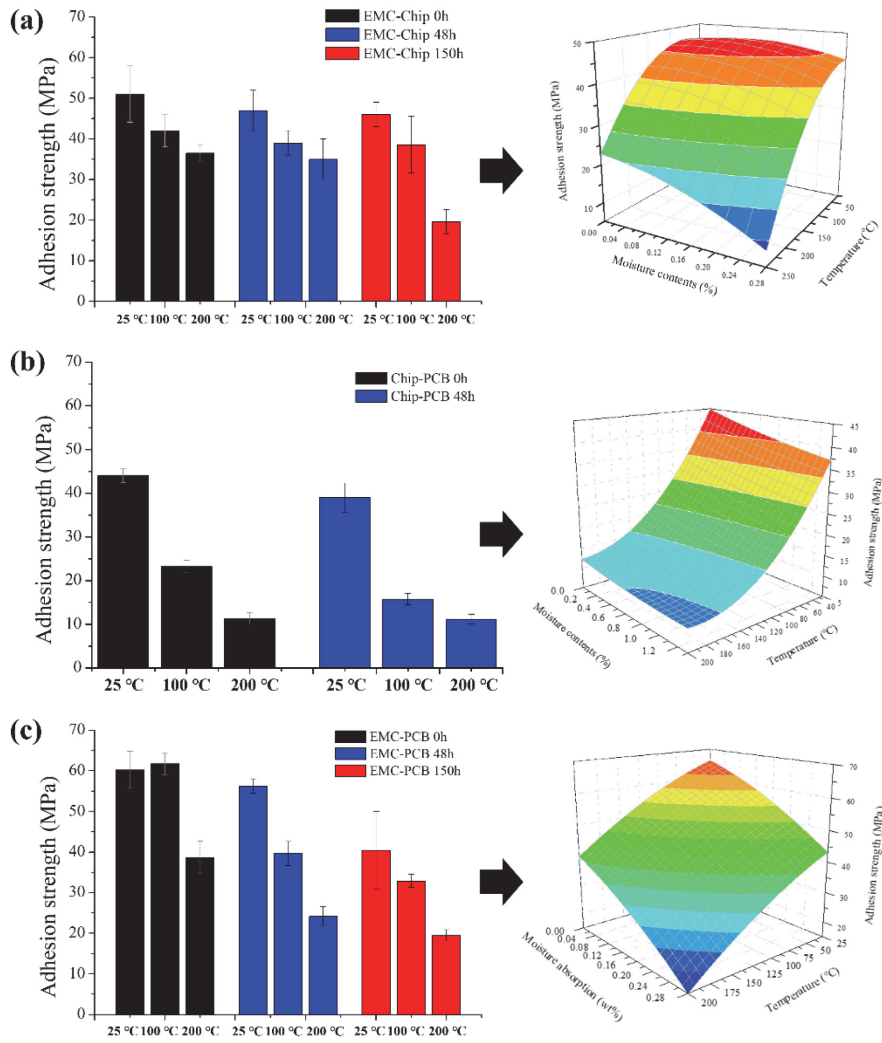


Fig. 3. The adhesion strength according to the temperature and moisture absorption as a result of micro-shear test, and 3D curve fitting results for (a)EMC-Chip, (b)Chip-PCB, and (c)EMC-PCB interfaces.

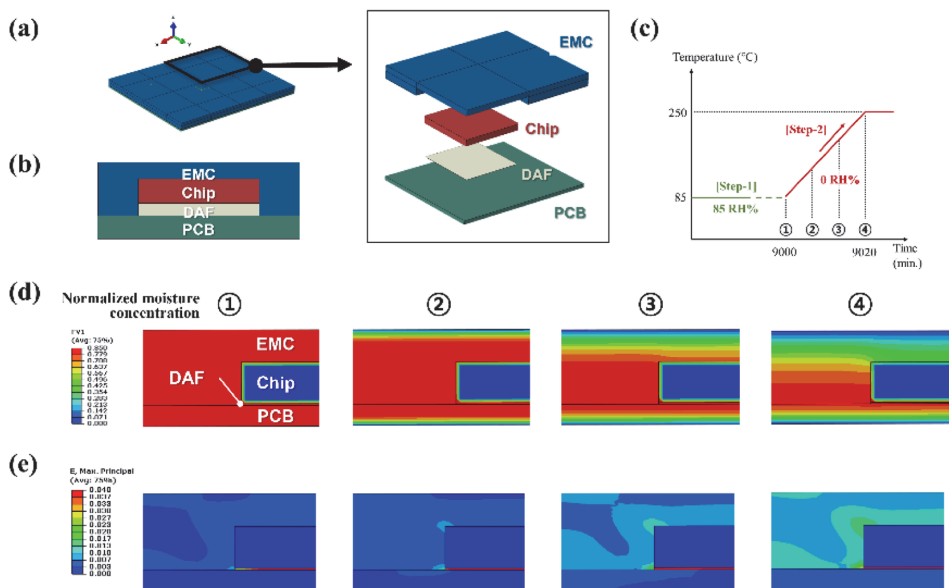


Fig. 4. (a) Schematic of 3D package structure for delamination prediction simulation. (b) The layer structure of package model in cross-section view. (c) The temperature profile during moisture absorption and reflow process in delamination simulation. Finite element simulation result: (d) normalized moisture concentration and (e) maximum principal strain.

보한 온도 및 흡습도에 따른 계면 강도는 3D 커브 피팅 후 피팅 파라미터를 이용하여 접합강도를 해석에 구현하였다.

수분의 흡습 및 탈습, 그리고 온도 변화에 따른 응력-변형률 거동 분석은 user subroutine (UMAT)을 통해 수행되었으며, 초기 박리 발생은 실제 온도와 흡습도에 따른 접합 강도를 반영함으로써 평가되었다. Fig. 4(c)는 해석에 사용된 PKG 구조와 85°C/RH85% 조건에서 150 시간 동안 흡습한 것과 리플로우를 반영하기 위해 250°C/RH0% 조건에서 20분 동안 해석을 수행한 온도 프로파일이 나타나 있다. 흡습 해석에 해당하는 step1 수행 시 PKG

구조 내 수분이 확산되어 충분히 포화된 상태를 확인할 수 있다 (Fig. 4(d)). 또한, 리플로우에 해당하는 step2 동안에 외부와의 경계에서 수분이 빠르게 빠져나가는 것을 알 수 있으며, 이러한 거동은 흡습에 의한 변형률 및 계면 강도에 영향을 미친다. Fig. 4(e)에서 볼 수 있듯이, 흡습 해석 이후, DAF 층에서 높은 CME 로 인한 최대 주변 형틀이 발생하였다. Step2 에 해당하는 리플로우 해석 동안 계면의 형상 불연속과 열팽창 차이로 인해 chip의 가장자리 주변으로 가장 큰 변형률이 발생한 것을 알 수 있다.

Fig. 5에 열-기계적 거동 해석 결과가 나타나 있다. 수

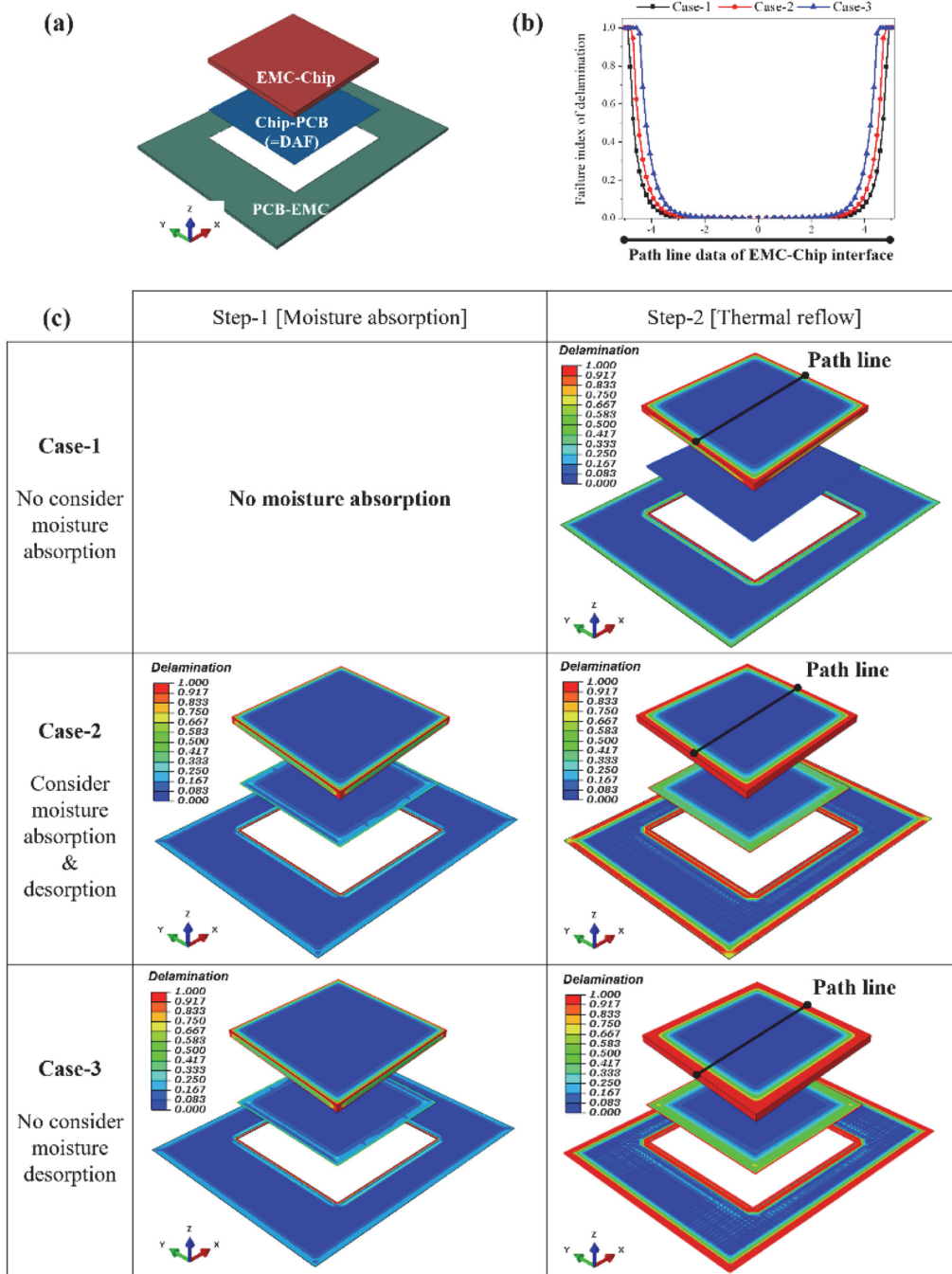


Fig. 5. (a) Three interface surfaces of package structure; (b) Delamination failure index of path line of EMC-Chip interface; (c) Delamination analysis results of three cases in moisture absorption and thermal reflow process.

본 팽창 및 열 팽창이 흡습 단계인 step1 과 리플로우 단계인 step2 에서 발생하였으며, 박리는 시편의 가장자리로부터 중심으로 서서히 진전되는 거동을 보인다. 더욱이, 박리는 주로 EMC-Chip 계면에 해당하는 chip의 표면에서 발생하였다. 해석 수행 시 수분 탈습이 고려 될 경우 박리가 과대평가되는 영역이 작으며 이는, 수분 탈습으로 인해 흡습도가 낮아지는 것이 반영되어 계면 강도가 높아지기 때문이다. 반면 수분 탈습이 고려되지 않을 경우 각 계면에서의 박리는 매우 심하게 발생하며 특히, EMC-Chip 과 PCB-EMC 계면 위쪽의 박리가 명확하게 차이 난다. Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 250°C에서의 EMC-Chip 계면의 path-line 데이터를 추출하여 각 케이스별로 비교하였다. 수분 탈습을 고려할 때 chip의 가장자리에서 박리 차이가 극심하게 발생하는 것을 알 수 있다. 더욱이, 이러한 차이는 패키지 구조가 복잡해질수록 커질 것으로 예상되며, 신뢰성 공정은 더욱 더 중요해질 것이다. 결과적으로 다양한 재료로 이루어진 패키지 구조의 정확한 신뢰성 해석을 위해서는 수분 흡습 뿐 아니라 탈습까지도 모두 고려되어야 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 패키지 재료(EMC, PCB, DAF)에 따라 확산계수, 포화 수분 함량, 및 수분 팽창 계수와 같은 흡습 물성을 여러 실험을 통해 확보하였다. 세 종류의 계면(Chip/EMC, Chip/PCB, 그리고 EMC/PCB)에 대해 온도 및 수분 함량도에 따른 계면 강도를 분석하였다. 이후 각 계면에서의 박리 거동을 예측하기 위하여, 리플로우 과정에서 수분의 흡습과 탈습을 모두 반영한 질량확산 모델과 열역학적 모델을 연계하여 유한요소 해석을 수행하였다. 결과적으로 개발된 해석 모델을 이용하여 실제 공정상의 온도 및 상대 습도에 따른 수분의 흡습 및 탈습을 고려한 복잡한 환경 조건에서의 박리를 성공적으로 예측하였다.

## 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). Also, this work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE)(20212020800090, Development and Demonstration of Energy-Efficiency Enhanced Technology for Temperature-Controlled Transportation and Logistics Center).

## References

1. E. R. Hnatek, "Integrated circuit quality and reliability", CRC Press, 808 (1995).
2. A. S. Oates, "Interconnect Reliability Challenges for Technology Scaling: A Circuit Focus", 2016 IEEE International Interconnect Technology Conference / Advanced Metallization Conference (IITC/AMC), IEEE, 16140092 (2016).
3. X. J. Fan and E. Suhir, "Moisture sensitivity of plastic packages of IC devices", Springer, USA (2010).
4. A. A. O. Tay, "Modeling of interfacial delamination in plastic IC packages under hygrothermal loading", J. Electron. Packag., 127(3), 265-275 (2005).
5. X. Fan, G. Q. Zhang, W. D. van Driel, and L. J. Ernst, "Interfacial delamination mechanisms during soldering reflow with moisture preconditioning", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 31(2), 252-259 (2008).
6. A. A. O. Tay and T. Y. Lin, "Influence of temperature, humidity, and defect location on delamination in plastic IC packages", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 22(4), 512-518 (1999).
7. S. K. Tran, D. L. Questad, and B. G. Sammakia, "Adhesion issues in flip-chip on organic modules", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 22(4), 519-524 (1999).
8. S. Yoon, B. Han, S. Cho, and C. -S. Jang, "Non-linear finite element analysis for electronic packages subjected to combined hygroscopic and thermo-mechanical stresses", 2005 7th Electronic Packaging Technology Conference, IEEE, 569-574 (2005).
9. D. K. Shin, J. J. Lee, C. K. Yoon, G. J. Lee, J. K. Hong, and N. S. Kim, "Development of single cantilever beam method to measure the adhesion of thin film adhesive on silicon chip", Engineering Fracture Mechanics, 133, 179-190 (2015).
10. X. Chen, S. Zhao, and L. Zhai, "Moisture absorption and diffusion characterization of molding compound", J. Electron. Packag., 127(4), 460-465 (2005).
11. Z. Huo, M. Mohamed, J. R. Nicholas, X. Wang, and K. Chandrashekhara, "Experimentation and simulation of moisture diffusion in foam-cored polyurethane sandwich structure", Journal of Sandwich Structures & Materials, 18(1), 30-49 (2016).
12. C. -H. Shen and G. S. Springer, "Moisture absorption and desorption of composite materials", Journal of Composite Materials, 10(1), 2-20 (1976).
13. H. -S. Kim, J. Huh, and J. Ryu, "Investigation of moisture-induced delamination failure in a semiconductor package via multi-scale mechanics", Journal of Physics D: Applied Physics, 44(3), 034007 (2010).
14. H. -S. Kim and H. G. Song, "Investigation of moisture-induced failures of stacked-die package", Microelectronics Reliability, 47(9-11), 1673-1679 (2007).
15. L. Ma, R. Joshi, K. K. Newman, and X. Fan, "Improved finite element modeling of moisture diffusion considering discontinuity at material interfaces in electronic packages", 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, 18990801 (2019).