전자 디바이스의 기계적 신뢰성 향상을 위한 언더필 재료의 물성 인자에 관한 연구

임 병 승* · 김 진 남* · 김 중 민**,*

*강원대학교 공학대학 기계시스템공학부

**중앙대학교 공과대학 기계공학부

Investigations of Material Properties of Underfill Material for Mechanical Reliability Improvement of Electronic Devices

Byung-Seung Yim*, Jin-Nam Kim* and Jong-Min Kim**,*

*School of Mechanical System Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do, 25913, Korea

**School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

†Corresponding author : 0326kjm@cau.ac.kr

(Received July 5, 2019 ; Revised July 29, 2019 ; Accepted August 8, 2019)

Abstract

In this paper, two types of underfill with different additive contents were formulated to investigate the effects of the underfill properties on the mechanical reliability of electronic packages in portable electronic devices. Dynamic mechanical analyses (DMA), tensile tests and shear tests were conducted to examine the material properties of the underfill, such as the storage modulus (E'), glass transition temperature (T_g), mechanical strength, stiffness and modulus of toughness. In the DMA and tensile test results for cured underfill specimens, Underfill 1 without a flexible additive showed a low modulus of toughness, and Underfill 2 with a small amount of flexible additive exhibited a high modulus of toughness. For underfills with a similar T_g value, the underfill with the higher modulus of toughness exhibited better mechanical reliability than the underfills with high strength, stiffness and low modulus of toughness, due to their fracture resistance to crack propagation. Therefore, the modulus of toughness of the underfill should be predominantly considered, when developing or selecting an underfill to enhance the mechanical reliability of electronic devices, rather than excessively high mechanical strength or stiffness.

Key Words : Area array packaging, Electronic device, Mechanical strength, Reliability, Toughness, Underfill

1. 서 론

전자 패키지 실장 기술의 발전 및 전자 기기의 경량화, 고집적화, 고기능화에 대한 사용자들의 요구를 충족시키기 위하여 BGA (Ball grid array), CSP (Chip scale package), WLP (Wafer level package) 등과 같은 면 정렬형 패키지 (Area array package)는 휴대폰이나 PDA (Portable digital assistant)와 같은 휴대용 전자 기기에 폭넓게 사용되고 있다^{1,2)}. 이와

같은 면 정렬형 패키지가 적용된 휴대용 전자 기기는 큰 하중에 의한 주기적인 진동이나 충격과 같은 동적 하중에 노출되는 경우 심각한 신뢰성 문제에 수시로 직면하게 된다. 이와 같은 면 정렬형 패키지 접합부의 신뢰성 문제를 해결하기 위한 방법으로 면 정렬형 패키지 접합부에 대한 언더필의 충진이 해법으로 적용되고 있다. 언더필은 기판 상에 접합된 패키지와 기판 사이의 틈에 충전된 후 경화되어 솔더 접합부를 수분이나 외부 환경으로부터 보호하고, 기계적 강도를 확보하며, 패키지와 기판 사이의 열팽창계수 (Coefficient of thermal

expansion: CTE) 불일치를 보완하여 솔더 접합부의 열 피로 파괴 (Thermal fatigue failure)를 막아주는 역할을 수행한다. 또한, 접합부에 공급된 언더필은 내/외부 환경으로부터 작용하는 진동이나 충격에 대한 접합부의 기계적 보호를 제공하여 접합부의 접합 특성 및 파단 수명을 월등하게 향상 시킨다^{3,4)}. 언더필이 패키지 접합부에서 양호한 기계적 보강제 역할을 수행하기 위해서는 기본적으로 높은 저장탄성계수 (Storage modulus, E'), 유리전이온도 (Glass transition temperature, T_g), 높은 강도, 인성 (Toughness) 및 접착력을 필요로 한다. 면 정렬형 패키지의 신뢰성 특성은 언더필의 재료 특성에 많은 영향을 받기 때문에 전자 디바이스가 사용될 환경 조건에서의 신뢰성을 극대화시킬 수 있는 언더필의 물성 변수가 고려되어야 한다.

본 연구에서는 휴대용 전자기기에 적용되는 면 정렬형 패키지의 기계적 신뢰성 향상에 중요하게 작용하는 언더필의 물성 변수를 선정하기 위하여 언더필의 합성에 사용되는 첨가제를 변수로 한 두 종류의 언더필을 합성하고, 동적기계분석 (Dynamic mechanical analysis: DMA), 인장 및 전단 테스트를 수행하여 언더필의 물성 변수를 평가하였다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

2.1 실험 재료

언더필의 재료 특성이 전자 디바이스의 기계적 접합 신뢰성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 두 종류의 언더필인 Underfill 1과 Underfill 2를 합성하였다. 언더필의 합성을 위해 열경화성 에폭시인 비스페놀 F와 아민계 경화제가 바인더와 경화제로 각각 사용되었으며, 언더필의 물성 변화를 위해 Underfill 2에는 유연화제를 소량 첨가하였다. 합성된 두 종류의 언더필은 150 °C 온도 하에서 10 분간 유지를 통해 경화가 완료된다.

2.2 실험 방법

2.2.1 동적기계분석

합성된 언더필의 동적 기계적 특성을 평가하기 위하여 DMA를 수행하였다. DMA를 위하여 30 × 10 × 2 mm 크기를 갖는 사각 바 형태의 언더필 경화시편을 제작하였다. DMA는 외팔보 모드 (Single cantilever mode) 로 수행하였으며 경화가 완료된 언더필 경화시편을 DMA의 고정부에 삽입하고, 온도 범위 25~180 °C, 가열속도 3 °C/min, 주파수 1 Hz의 조건 하에서 온도의 변

화에 따른 정현파 응력 (Sinusoidal stress)에 대한 언더필 경화시편의 기계적 응답을 산출하여 물성 변화를 측정하였다.

2.2.2 인장 테스트

합성된 언더필의 기계적 특성을 평가하기 위하여 언더필 경화시편에 대한 인장 테스트를 수행하였다. 인장 테스트를 위하여 폭 15 mm, 전체 길이 70 mm, 두께 3 mm, 게이지부의 폭 6 mm, 게이지부의 길이 25 mm의 규격을 갖는 인장 경화시편을 제작하였다. 경화가 완료된 언더필 인장 시편을 만능인장시험기 (Universal testing machine: UTM)의 그림부에 고정하고 상온 환경에서 2 mm/min의 인장속도로 축 방향 인장하중을 가하며 인장 시편의 변형율 (Strain, ϵ) 및 인장 응력 (Tensile stress, σ)을 측정하였다.

2.2.3 전단 테스트

인쇄회로기판 (Printed circuit board: PCB) 및 패키지에 대한 언더필의 접착특성을 평가하기 위하여 PCB 상에 언더필에 의해 접착된 패키지에 대한 전단 테스트를 수행하였다. 전단 테스트를 위하여 Fig. 1(a)에 나타난 3.0 × 3.0 × 0.93 mm 크기의 더미 패키지의 하부에 언더필을 도포하고 세정이 완료된 PCB 상에 실장한 후 온도 조건 150 °C로 10분간 가열하여

Fig. 1 (a) Configuration of the shear test specimen and (b) schematic of the shear test

패키지를 접착하였다. Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 PCB 상에 패키지의 접착이 완료된 후 전단 테스트 장비의 고정 지그에 PCB를 고정하고 접착된 패키지의 수평 방향으로 전단 속도 10 mm/min의 전단 하중을 인가하여 언더필의 접착특성을 평가하였다. 전단 테스트가 완료된 후 주사전자현미경 (Scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 파단면에 대한 파단 모드 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 언더필 재료의 동적 기계적 특성

동적 기계적 특성은 주기적인 힘을 받는 대상 재료의 동적 응답에 의해 측정되며, 재료의 강성과 탄성계수를 결정하는 E' 와 변형에 대해 소산되는 에너지를 나타내는 손실탄성계수 (Loss modulus, E'')로 구성되는 복소 탄성계수 (Complex modulus)로 나타난다. 또한, E' 와 E'' 의 비인 손실 계수 (Loss factor, $\tan\delta$) =

Fig. 2 Variation of (a) storage modulus (E') and (b) loss factor ($\tan\delta$) as a function of temperature for the different underfills

E''/E' 의 피크 온도 값은 대상 재료의 T_g 를 나타낸다^{5,6)}. 합성된 두 종류의 언더필에 대한 DMA 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에서 나타난 바와 같이 underfill 1은 underfill 2 보다 높은 E' 을 나타내어 상대적으로 높은 강성을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)에서 나타난 온도 변화에 따른 언더필의 $\tan\delta$ 곡선에서 확인할 수 있는 바와 같이 두 종류의 언더필은 비슷한 T_g (Underfill 1: 69.8 °C, Underfill 2: 67.9 °C)를 갖는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 통하여 동일한 온도조건 하에서 Underfill 1은 열경화성 에폭시의 고유 특성으로 인해 소량의 유연화제가 첨가된 Underfill 2와 비교하여 상대적으로 높은 기계적 강성을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 인장 하중에서의 언더필 재료의 기계적 특성

언더필의 탄성계수와 강성, 강도와 같은 기계적 특성은 솔더 접합부에 작용하는 응력의 효과적인 분산 및 기계적 지지를 위하여 매우 중요하게 고려되어야 하며, 각각의 특성들은 충분히 높은 값을 확보하여야 한다. 인장 테스트를 통하여 얻은 언더필 경화시편의 σ - ϵ 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, Underfill 1은 높은 인장강도 (50.86 ± 2.015 MPa)와 매우 낮은 파단 변형률을 나타내었으며, σ - ϵ 곡선은 소성 유동이 포함되지 않은 취성 파단 특성을 나타내었다. 이에 반하여, Underfill 2는 선형 탄성 영역과 소성 유동 영역으로 구성되는 준-연성 파단거동을 나타내었으며, Underfill 1과 비교하여 상대적으로 낮은 인장강도 (26.41 ± 0.502 MPa)와 큰 변형률을 나타내었다. 앞선 DMA 결과에서도 확인한 바와 같이, σ - ϵ 곡선에서의 선형 탄성영역의 기울기를 통하여 Underfill 1은 Underfill 2 보다 높은 강성

Fig. 3 Stress-strain curves of the different underfills under tensile load condition

(Stiffness)을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 이에 반하여, 재료가 완전히 파괴될 때까지 흡수하는 에너지인 인성을 의미하는 σ - ϵ 곡선의 밑면적은 Underfill 2가 유연화제 첨가에 의한 연성 증가로 인해 Underfill 1보다 넓은 면적을 나타내었다. 이를 통하여, Underfill 1은 Underfill 2와 비교하여 높은 인장강도와 강성을 나타내며, 열경화성 에폭시 재료 고유의 취성과 낮은 인성 특성을 갖는다는 사실을 확인하였다.

3.3 언더필 재료의 전단 특성

전자 패키지를 위한 언더필 재료의 선택에 있어, 언더필의 접착력은 기계적 혹은 열적 하중 조건 하에서 패키지/언더필, 언더필/PCB 사이의 계면 박리 (Delamination)의 방지를 통하여 전자 패키지의 기계적 신뢰성을 확보하기 위해 매우 중요하게 고려되어야 한다.

합성된 두 종류의 언더필의 PCB 및 패키지에 대한 접착력을 평가하기 위하여 전단 테스트를 수행하였다. 합성된 언더필에 의해 PCB 상에 접착된 패키지의 전단강도를 Fig. 4에 나타내었다. 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, Underfill 1은 Underfill 2와 비교하여 상대적으로 낮은 전단강도 (Underfill 1: 26.75 ± 2.102 MPa, Underfill 2: 34.05 ± 2.331 MPa)를 나타내었다.

언더필의 기계적 강성은 솔더 접합부에 대한 보강 효과를 제공하며, 강성이 큰 언더필은 응력 완화를 통해 접합부의 파단을 방지한다⁴⁾. 앞선 DMA와 인장 테스트를 통하여 확인한 바와 같이 Underfill 1이 Underfill 2보다 높은 기계적 강성을 나타내었으나, Underfill 1의 전단강도는 Underfill 2보다 상대적으로 낮게 나타났다. 이와 같은 전단강도 결과의 원인을 확인하기 위하여 언더필 파단면에 대한 파단모드 분석을 수행하였다. 고분자 접착제의 파단모드는 접착제와 피접착제의 계면을 따라 파단이 전파되는 접착 (Adhesive) 파단모드, 접착제의 내부영역을 따라 파단이 전파되는 응

집 (Cohesive) 파단모드, 접착 및 응집 파단모드가 혼재하며 전파되는 혼합 (Mixed) 파단모드로 분류되며, 접착제가 우수한 접착력을 확보할수록 응집 파단모드의 경향을 나타낸다⁷⁾.

Fig. 5(a)에 나타낸 Underfill 1의 파단모드에서 확인할 수 있는 바와 같이, Underfill 1에서의 파단은 접착 파단모드와 응집 파단모드가 혼재된 혼합 파단모드를 나타내었으며, 응집 파단이 발생한 파단면은 적은 수의 완만한 전단층 (Shear step)을 포함하였다. 취성 고분자 접착제에서의 파단은 재료 고유의 특성 (높은 강성 및 낮은 인성)으로 인해 취성 재료를 파열시키는 응집 파단모드보다는 계면을 따라 전파되는 계면 (혹은 접착) 파단의 경향을 나타낸다⁸⁾. 이에 반하여, Underfill 2의 파단은 대부분의 파면에서 응집 파단모드를 나타내었으며 소량의 접착 파단을 포함하였다. 또한, 응집 파단이 발생한 파단면은 Underfill 1과 비교하여 상대적으로 거칠고 조밀한 형상을 갖는 많은 수의 전단층을 포함하였다. 앞선 인장 테스트 결과에서 확인된 바와 같이 Underfill 2는 유연화제 첨가에 의한 연성 증가로 인해 Underfill 1보다 큰 파괴인성을 가지고 있으며, 이로 인하여 응집 파단모드가 주를 이루는 파단면의 형상으로 인해 Underfill 1보다 더 높은 전단강도를 나타낸 것이라 사료된다. 이에 반하여, Underfill 1은 비록 높은 기계적 강도와 강성을 가지고 있으나, 이

Fig. 4 Shear strength of the different underfills

Fig. 5 Fracture surface of the underfills after die shear test for the (a) Underfill 1 and (b) Underfill 2

에 따른 취성 파괴 특성으로 인한 접착 파단 영역의 증가와 낮은 인성으로 인한 전단 변형저항의 감소로 인해 취약한 기계적 특성을 나타낸 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 휴대용 전자기기에 적용되는 먼 정렬형 패키지의 기계적 신뢰성 향상에 중요하게 작용하는 언더필의 물성 변수를 선정하기 위하여 언더필의 합성에 사용되는 첨가제를 변수로 한 두 종류의 언더필을 합성하고, DMA, 인장 및 전단 테스트를 수행하여 언더필의 물성 변수를 평가하였다. 평가 결과를 통하여, 언더필 재료의 강도와 강성이 증가함에 따라 수반되는 취성 파괴 특성으로 인한 접착 파단 영역의 증가와 낮은 인성으로 인한 전단 변형저항의 감소로 인해 패키지 접합부의 기계적 신뢰성이 악화되며, 높은 인성을 갖는 언더필 재료는 크랙 전파에 대한 저항으로 인해 높은 강도와 강성 및 낮은 인성을 갖는 언더필 재료보다 뛰어난 기계적 신뢰성을 나타낸다는 사실을 확인하였다. 이와 같은 결과들을 통하여 전자 디바이스의 기계적 신뢰성을 향상시키기 위해서는 언더필의 높은 기계적 강도 및 강성이 요구되나, 지나치게 높은 강성은 언더필의 접착력 및 전단 변형저항을 감소시켜 기계적 신뢰성을 악화시키는 원인으로 작용할 수 있으므로 지나치게 높은 강성보다는 인성을 중요하게 고려한 물성 설계가 이루어져야 한다는 결론을 얻었다.

후 기

본 논문은 2018년도 강원대학교 대학회계 학술연구 조성비 및 2017년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2017R1C1B5076997)으로 연구되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

ORCID: Byung-Seung Yim: <http://orcid.org/0000-0002-9181-3845>
ORCID: Jong-Min Kim: <http://orcid.org/0000-0001-9206-0382>

References

1. B. S. Yim, S. H. Jeon and J. M. Kim, Electrically Conductive Adhesive using Low-Melting-Point Alloy and Bonding Process using Them, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 27(3) (2009) 23-31.
<https://doi.org/10.5781/kwjs.2009.27.3.023>
2. K. S. Kim, W. O. Han and E. G. Chang, Improvement of Interface Adhesion in Ball Grid Array Packages by Plasma Treatment, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 18(4) (2000) 64-69.
3. L. Wang and C. P. Wong, Novel Thermally Reworkable Underfill Encapsulants for Flip-Chip Applications, *IEEE Trans. Adv. Packag.* 22 (1999) 46-53.
<https://doi.org/10.1109/6040.746542>
4. C. T. Kuo, M. C. Yip and K.N. Chiang, Time and Temperature-Dependent Mechanical Behavior of Underfill Materials in Electronic Packaging Application, *Microelectron. Reliab.* 44 (2004) 627-638.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2003.10.005>
5. M. Akay, Aspects of Dynamic Mechanical Analysis in Polymeric Composites, *Compos. Sci. Technol.* 47 (1993) 419-423.
[https://doi.org/10.1016/0266-3538\(93\)90010-e](https://doi.org/10.1016/0266-3538(93)90010-e)
6. K. C. Manikandan Nair, S. Thomas and G. Groeninckx, Thermal and Dynamic Mechanical Analysis of Polystyrene Composites Reinforced with Short Sisal Fibres, *Compos. Sci. Technol.* 61 (2001) 2519-2529.
[https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(01\)00170-1](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(01)00170-1)
7. Y. C. Lin, X. Chen and Z. P. Wang, Effects of Hygrothermal Aging on Anisotropic Conductive Adhesive Joints: Experiments and Theoretical Analysis, *J. Adhesion Sci. Technol.* 20 (12) (2006) 1383-1399.
<https://doi.org/10.1163/156856106778456654>
8. D. A. Dillard and A.V. Pocius, *The Mechanics of Adhesion*, Elsevier Science, New York, USA (2002) 437-439.