

Bendable 임베디드 전자모듈의 손상 메커니즘

조 윤 성* · 김 아 영* · 홍 원 식*[†]

*전자부품연구원 부품소재물리연구센터

Failure Mechanism of Bendable Embedded Electronic Module Under Various Environment Conditions

Yun-Seong Jo*, A Young Kim* and Won Sik Hong*[†]

*Components & Materials Physics Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam-si 463-816, Korea

[†]Corresponding author : wshong@keti.re.kr

(Received September 17, 2013 ; Revised October 1, 2013 ; Accepted October 7, 2013)

Abstract

A bendable electronic module has been developed for a mobile application by using a low-cost roll-to-roll manufacturing process. In flexible embedded electronic module, a thin silicon chip was embedded in a polymer-based encapsulating adhesive between flexible copper clad polyimide layers. To confirm reliability and durability of prototype bendable module, the following tests were conducted: Moisture sensitivity level, thermal shock test, high temperature & high humidity storage test, and pressure cooker tester. Those experiments to induce failure of the module due to temperature variations and moisture are the experiment to verify the reliability. Failure criterion was 20% increase in bump resistance from the initial value. The mechanism of the increase of the bump resistance was analyzed by using non-destructive X-ray analysis and scanning acoustic microscopy. During the pressure cooker test (PCT), delamination occurred at the various interfaces of the bendable embedded modules. To investigate the failure mechanism, moisture diffusion analysis was conducted to the pressure cooker's test. The hygroscopic characteristics of the encapsulating polymeric materials were experimentally determined. Analysis results have shown moisture saturation process of flexible module under high temperature/high humidity and high atmosphere conditions. Based on these results, stress factor and failure mechanism/mode of bendable embedded electronic module were obtained.

Key Words : Bendable electronic module, Flexible, Moisture absorption, Delamination, Failure mechanism

1. 서 론

전자제품의 다기능 융복합화 및 휴대편의성 경향은 이제 더 이상 새로운 것이 아니다. 이러한 추세에 따라 전자부품들은 모듈화되고, 휴대하기 용이해지고 있다. 따라서 최근의 전자부품은 집적화되고 있으며, 기구적 한계를 극복하기 위한 플렉서블 모듈의 사용이 증가하고 있다. 양산측면에서는 롤투롤(roll-to-roll, R2R) 방식을 적용함으로써 생산성을 극대화하고 있다. 이때

R2R 적용을 위해서는 제품이 굴곡될 수 있도록 유연성이 보장되는 유연성 전자모듈의 개발이 필수적으로 요구되고 있다. 플렉서블 기판은 일반 전자제품에 사용되고 있지만, 플렉서블 기판 내부에 칩이 내장되고, 회로가 형성되어 자체적으로 기능을 수행할 수 있도록 한 유연성 전자모듈을 R2R 방식으로 제조하는 기술은 새로이 개발된 기술이다^{1,2)}. 개발된 유연성 모듈에 대한 다양한 신뢰성 시험을 통해 내구성을 검증하였다³⁾. 또한 이로부터 발생된 고장모드 및 메커니즘을 해석하였고, 특히 고온가압시험(pressure cooker test, PCT)

조건에서 습기에 의한 손상 메커니즘을 도출하였다.

2. 실험 방법

내장형 유연성 전자모듈(embedded bendable electronic module)의 외관 사진과 내부구조의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 최외곽의 도포층(coverlayer: PI)의 두께는 50 μm 이고, 접착제 상하에 연성동박적층판(flexible copper clad laminate, FCCL)의 두께는 20 μm 이며, 접착제(adhesive film)의 두께는 50 μm 이다. 도포층/연성동박적층판/접착제/연성동박적층판/도포층을 형성하여, 총 4층 구조로 제작하였다. 최종 적층된 유연성 모듈의 총 두께는 200 μm 이다. 모듈 내의 실리콘 칩의 두께는 30 μm 이고, 실리콘 칩의 골드범프(Au bump)는 이방성도전필름(anisotropic conductive film, ACF)을 사용하여 회로패턴(circuit pattern: copper line)과 접합하였다.

Bendable 샘플 제작을 위한 적층 조건은 170 $^{\circ}\text{C}$, 55 kgf/cm^2 조건에서 90 분간 열압착하여 제작하였으며, 승온 및 냉각 속도는 각각 4.3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 와 3.25 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이었다²⁾. 모듈 내부의 마이크로 비아 형성은 UV laser로 Cu를 open하고 CO₂ laser로 resin drilling 공정으로써 내, 외층 정밀도 향상 및 UV laser를 통한 $\leq 40 \mu\text{m}$ via hole의 제조가 가능한 UV+CO₂ laser drill process로 제조하였고, UV+CO₂ combi type을 사용하여 micro via interconnection을 제조한 후 Cu filling을 통해 via filling을 수행하였다²⁾.

개발된 유연성 전자모듈의 신뢰성을 검증하기 위하여 신뢰성시험을 수행하였다. 신뢰성 평가는 습기민감도시험(moisture sensitivity levels test, MSL), 열충격 시험(thermal shock test, TS), 고온고습시험(high

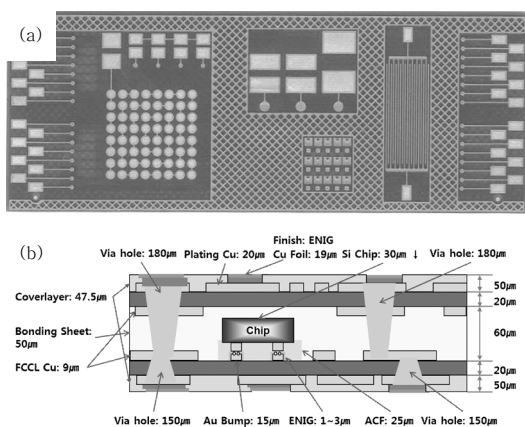


Fig. 1 (a) Photograph of developed bendable electronic module and (b) the illustration of its cross sectional structure

Table 1 Test conditions of reliability assessment for bendable modules

Test Item	Test Conditions
MSL	(MSL 3 level) Baking 125 $^{\circ}\text{C}$, 24 h \rightarrow 30 $^{\circ}\text{C}$, 60% RH, 192 h \rightarrow Reflow (260 $^{\circ}\text{C}$, 3 times)
TS	-55 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ min.}$ \sim 125 $^{\circ}\text{C}/10 \text{ min.}$, 500 Cycles
HTHH	85 $^{\circ}\text{C}$, 85% RH, 96 hrs
PCT	121 $^{\circ}\text{C}$, 100% RH, 2 atm, 96 hrs

temperature high humidity storage test, HTHH), 고온가압시험(pressure cooker test, PCT)를 수행하였다. 신뢰성 평가 시험항목별 시험 조건은 Table 1에 나타내었다.

Bendable electronic module 제조 후 모듈 전체의 흡습특성 분석을 위해 흡습시험을 수행하였다. 상대습도에 따른 흡습 정도를 분석하기 위해 85, 95 %RH/85 $^{\circ}\text{C}$ 조건에서 흡습시험을 수행하였다⁴⁻¹⁰⁾.

신뢰성 평가 분석을 위해 X선(X-ray) 비파괴 분석과 초음파 분석(C-SAM) 그리고 단면분석을 실시하였다. X-ray 비파괴분석은 X-TEK사의 Revolution 모델을 이용하여 촬영하였고, 초음파 분석은 Acoulab사의 SAM-EGA를 이용하여 분석하였다. 단면분석은 폴리싱된 시편을 Philips의 ESEM-FEG XL-30을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

신뢰성 평가 전후 bendable module의 고장유무를 확인하고자 bump의 전기 저항 측정을 수행하였다. 전기저항은 daisy chain으로 연결된 Si chip과 bump의 접촉저항을 2-point probe 방식으로 측정하였다. 고장의 판단기준은 전기저항의 변화율이 초기 저항 대비 20% 이상 증가되면 고장으로 판단하였다. Table 2에 제시된 전기저항 변화율을 보면 습기민감도시험의 저항 변화율은 2.95%, 열충격시험은 1.28%, 고온고습시험은 0.14% 증가하여 bendable 모듈의 고장은 발생하지 않은 것으로 판단하였다. 고온가압시험의 경우, bump의 전기저항은 수십 Ω 이상 증가하였거나, 단선(open) 현상이 발생하였다.

Fig. 2는 습기민감도, 열충격, 고온고습 그리고 고온

Table 2 Resistance variation of bendable module

Tests	Before (Ω)	After (Ω)	Variation
MSL	22.49	23.16	2.95%
TS	22.77	23.06	1.28%
HTHH	22.80	22.83	0.14%
PCT	22.55	> 26.89	> 20%

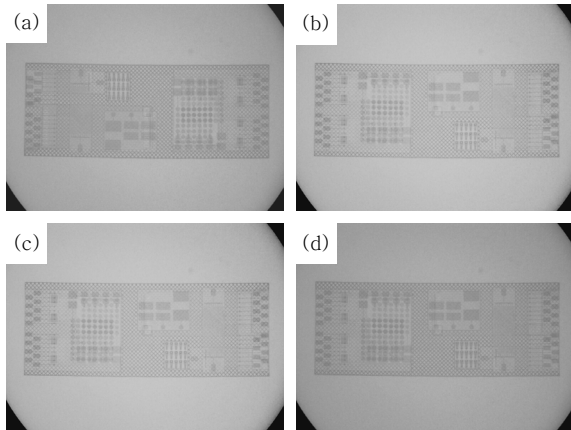


Fig. 2 Photographs of X-ray analysis of bendable modules after reliability test: (a) MSL, (b) TS, (c) HTHH and (d) PCT

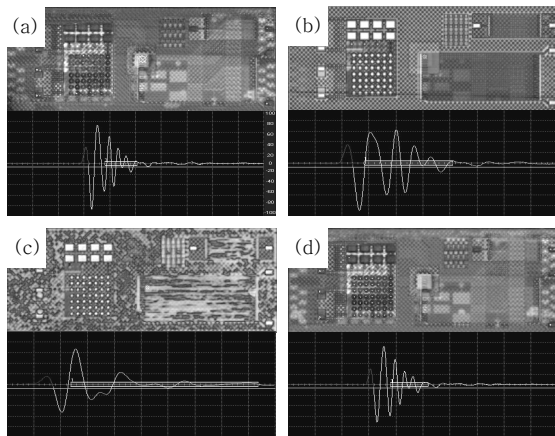


Fig. 3 Photographs of scanning acoustic microscopy analysis of bendable modules after reliability test: (a) MSL, (b) TS, (c) HTHH and (d) PCT

가압시험에 대한 X-ray 비파괴 분석결과이며, Fig. 3은 초음파분석의 결과이다. 초음파 분석 결과, 습기민감도, 열충격 그리고 고온고습시험에서는 박리(delamination) 현상이 관찰되지 않았으나, 고온가압시험의 경우, 박리가 관찰되었다. 초음파분석 결과에서 박리발생에 대한 판단기준은 초음파 분석파형(wave shape)이 180° 위상차를 나타내는 경우로 정의하였다. 이것은 박리 발생 시 공기층의 형성에 따라 파형이 역전(inversion)되어 발생되기 때문이다. Fig. 3과 같이 bendable 모듈의 분석결과, embedded Si chip 부위에서 초음파 분석 파형이 180° 반전된 위상으로 나타남에 따라 박리가 발생된 것으로 판단된다.

패키지 및 유연성 부품의 대표적 고장모드인 박리는 플렉서블 부품(flexible module)의 주요 고장 메커니즘(failure mechanisms)이다. 박리는 반복적으로 가

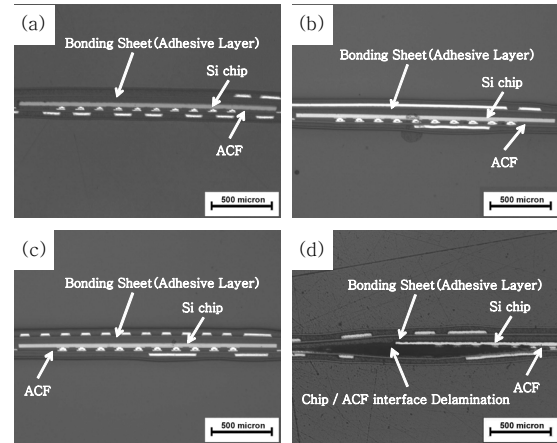


Fig. 4 Cross-Sectional micrographs of bendable electronic module after various reliability test: (a) MSL, (b) TS, (c) HTHH and (d) PCT

해지는 스트레스로 인해 여러 층으로 이루어져 있는 재료간의 접촉계면에 피로가 누적되고 누적된 응력이 접합력(adhesion)의 범위를 초과하면 재료간의 접합계면이 분리되는 현상이다¹¹⁾.

습기민감도, 열충격 그리고 고온고습시험에 대한 단면분석 결과, Fig. 4 (a-c)에서와 같이 박리현상은 발생하지 않았다. 그러나 고온가압시험으로부터 고장이 발생한 모듈에 대한 단면분석 결과, Fig. 4 (d)와 같이 실리콘 칩과 ACF 계면에서 박리현상이 관찰되었다. 이런 박리현상은 -55~125 °C 조건하에서 수행하는 열충격시험에서는 발생하지 않았으나, 고온가압시험으로부터 박리가 관찰되었다. 고온가압시험은 100 °C 이상에서 습기를 다량으로 침투시킬 수 있는 시험방법이다. 따라서 bendable 모듈에서 발생된 박리현상의 주요 원인은 습기침투에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 각 습도별 흡습 변화를 나타내었다. Table 3은 습도 조건에 따른 최대 흡습률 및 포화시간을 나타

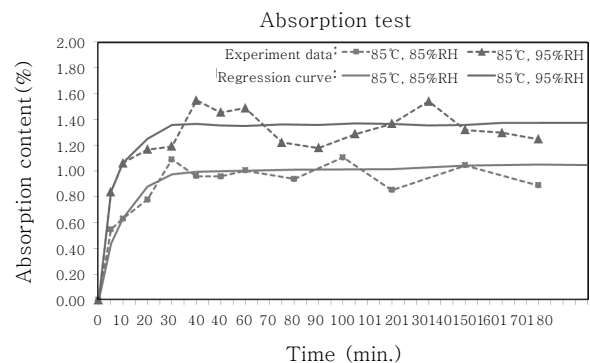


Fig. 5 Moisture absorption content behavior with absorption time

Table 3 Maximum moisture absorption content of bendable module with relative humidity at 85 °C

Items	Temperature	85 °C	
	Humidity	85% RH	95% RH
Absorption Max. Content (%)		1.306	1.547
Moisture Saturation Time (min.)		30	30

내었다. Fig. 5와 Table 3을 분석하면 습도가 높을수록 다량의 습기가 bendable module 내에 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 최소 20 분 후에는 모듈의 수분 흡습이 90% 이상 포화상태가 진행되었고, 30 분 후에 최대 포화됨을 알 수 있다. 따라서 121 °C, 100% RH에서 96 시간 진행되는 고온가압시험조건에서는 40 분 이내에 bendable 전자모듈이 최대 포화상태가 되는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 박리를 유발하는 주요 스트레스별 고장모드와 메커니즘을 나타내는 fish-born 다이어그램이다. 그중 박리가 스트레스적 요인을 통해 유발될 경우에는 습기와 열 그리고 기계적 스트레스 요인 등 복합적 요인을 통해 발생한다고 나타나있다. 그리고 습기로 인한 응력의 크기가 열적 응력보다 크게 작용하는 것으로 관찰되었다^{11,12}. 흡습량이 많을수록 박리에 영향이 클 것으로 판단된다.

습기민감도시험(MSL Level 3)의 시험조건은 여러 조건으로 단계적으로 이루어져 있으나, 습도와 온도의 조건이 고온고습시험이나 고온가압시험에 비해 높지 않다. 열충격시험은 고온과 저온의 반복적 온도편차에 의

한 시험으로, 습도조건이 흡습에 의한 영향이 없는 것으로 판단된다. 고온고습시험은 열충격시험보다 흡습에 의한 변형응력이 높게 작용하는 것으로 생각된다. 하지만 습도와 온도 조건이 고온고압시험보다 낮기 때문에 흡습에 의한 변형 응력은 상대적으로 작게 작용된다. 따라서 습도와 온도 조건이 가장 높은 고온고압시험이 모듈 내의 흡습량이 가장 많은 것으로 판단된다. 또한, bendable 모듈제조에 사용된 재료들의 수분 흡습에 대한 Hong⁶⁾ 등의 선행 연구 결과에 따르면, adhesive film이 ACF, PI에 비해 수분 흡습율이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험결과에서도 주요 박리가 발생된 부위가 chip/adhesive 부위인 것으로 보아 adhesive film 층의 수분 흡습특성을 향상시키는 것이 bendable 모듈의 박리 발생에 대한 억제 방법으로 사료된다. Bendable 모듈이 다량의 흡습으로 인해 모듈 내부의 이종접합계면에 변형응력을 유발함으로써, 이종 재료간의 계면 접착력을 감소시켜 결과적으로 박리에 의한 고장을 유발하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 bendable 임베디드 전자모듈에 대한 내구 접합 신뢰성을 검증하였고 이로부터 발생된 박리현상에 대한 고장 메커니즘을 해석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) Bendable 전자모듈의 박리현상은 흡습조건이 가장 가혹한 고온가압시험조건에서만 발생하였고, 그 외 습기민감도시험, 열충격시험 및 고온고습시험에서는 발생하지 않았다. 따라서 고온가압시험이 bendable 모듈의 박리를 유발하는 가장 가혹한 환경조건인 것을 확인하였다.

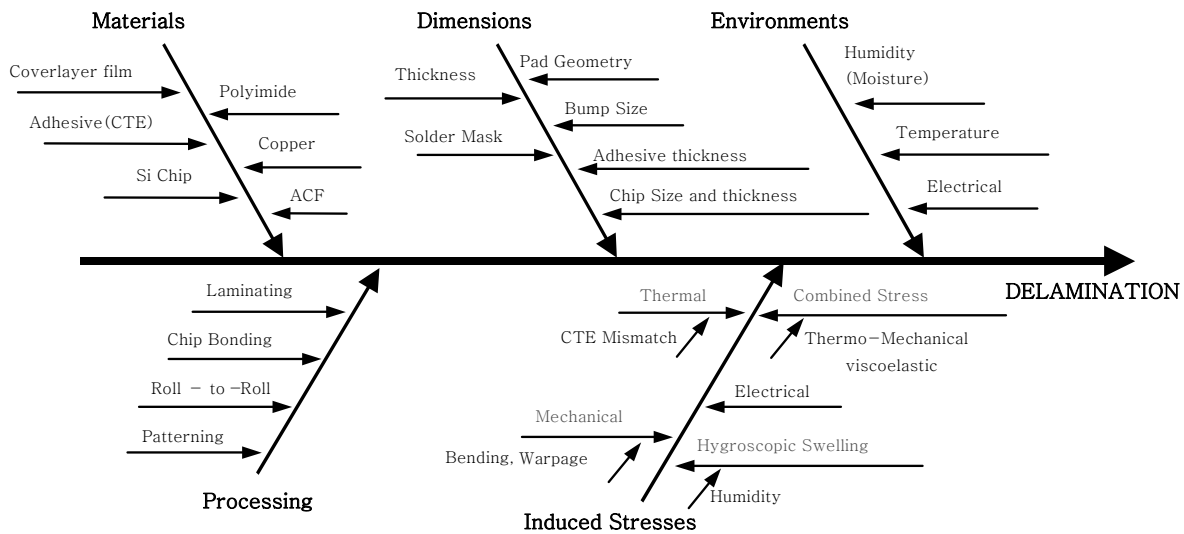


Fig. 6 Fish Born analysis of delamination mechanism of bendable electronic module

2) 고온가압시험조건 하에서 30 분 경과 후, bendable 모듈의 흡습은 포화상태에 도달하였으며, 60 분 경과 후에는 모듈 내부로 모든 습기의 확산이 종결되는 최대 포화상태가 되는 것으로 나타났다.

3) 동일한 온도조건 하에서 상대습도가 높을수록 포화되는 수분량이 많은 것으로 나타났다. 또한 bendable 모듈 내에 흡습된 수분에 의한 변형 응력에 의해 이중 접합계면의 박리현상이 나타난 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 제조기반 산업융합원천기술개발사업(생산기반, 과제번호 10031768) 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

Reference

1. G.H. Wang, Y.S. Cho, S.T. Hong, J.G. Kim, W.S. Choi, J.D. Kim, J.C. Ryu, W.S. Hong and C.M. Oh : Active-Device-Embedded of Bendable Electronic Module, 12th International Conference on Electronic Materials and Packaging, Singapore, Oct. (2010)
2. D.G. Kim, S.T. Hong, D.H. Kim, W.S. Hong and C.W. Lee : Fabrication and Reliability Test of Device Embedded Flexible Module, Journal of KWS, **31-3** (2013), 84-88 (in Korean)
3. W.S. Hong and C.M. Oh : PoF Based Accelerated Life Prediction with 3 Dimensional Packaging Technology Development, Journal of KWS, **27-3** (2009), 10-16 (in Korean)
4. S.S. Yoon, Z.Y. Wang and B.T. Han : On Moisture Diffusion Modeling Using Thermal-Moisture Analogy, ASME Journal of Electronic Packaging, **129** (2007), 421-426
5. C.S. Jang, B.T. Han, S.S. Yoon and S.B. Park : Advanced Thermal-Moisture Analogy Scheme Anisothermal Moisture Diffusion Problem, ASME Journal of Electronic Packaging, **130** (2008), 011004.1-011004.8
6. W.S. Hong, C.M. Oh, C.W. Han, G.H. Wang, S.T. Hong and J.D. Kim : Moisture Diffusion Coefficient and Activation Energy of Adhesive Film for Flexible Embedded Electronic Module, 12th International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP 2010), Singapore, Oct (2010)
7. T. Ikeda, W.K. Kim and N. Miyazaki : Evaluation of the Delamination in a Flip chip Using Anisotropic Conductive Adhesive Films Under Moisture/reflow Sensitivity Test, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, **29-3** (2006), 551-559
8. M.G. Penon, S.J. Picken, M. Wübbenhorst, G. de Vos, J and Van Turnhout : Dielectric Water Sorption Analysis, Review of Scientific Instruments, **77-11** (2006), 115107.1-115107.6
9. C.W. Han, C.M. Oh and W.S. Hong : Moisture Diffusion Analysis for Bendable Electronic Module Under Autoclave Test Condition, Journals of Mechanical Science and Technology, **36-5** (2012), 523-528 (in Korean)
10. J. E. Galloway and B. M. Miles : Moisture Absorption and Desorption Predictions for Plastic Ball Grid Array Packages, IEEE Transaction on Packaging and Manufacturing Technology-Part A, **20-3** (1997), 274-279
11. W.J. Cantwell and J. Morton, b : The impact resistance of composite materials -- a review. Composites, **22-5** (1991), 347-362
12. E.H. Wong, K.C. Chan, R. Rajoo and T.B. Lim : The Mechanics and Impact of Hygroscopic Swelling of Polymeric Materials in Electronic Packaging, Electronic Components and Technology Conference 2000, (2000), 576-580
13. J.R. Branco, J.A. Ferreira and P. da Silva : Non-Fickian delay reaction-diffusion equations: Theoretical and numerical study, Applied Numerical Mathematics, **60** (2010), 531-549
14. S.S. Yoon, C.S. Jang and B.T. Han : Nonlinear Stress Modeling Scheme to Analyze Semiconductor Packages Subjected to Combined Thermal and Hygroscopic Loading, ASME Journal of Electronic Packaging, **130-2** (2008), 024502-1-024502-5
15. J.H. Yoon and Y.E. Shin : A prediction of the thermal fatigue life of solder joint in IC package for surface mount, Journal of KWS, **16-4** (1998), 348-353 (in Korean)