

열·습도 복합하중에서의 유연성 전자모듈에 대한 구조해석

한창운*† · 오철민* · 홍원식*

* 전자부품연구원 부품소재물리연구센터

Stress Analysis for Bendable Electronic Module Under Thermal-Hygroscopic Complex Loads

Changwoon Han*†, Chulmin Oh* and Wonsik Hong*

* Components & Materials Physics Research Center, Korea Electronics Technology Institute

(Received October 4, 2012 ; Revised January 30, 2013 ; Accepted January 31, 2013)

Key Words: Bendable Electronic Module(유연성 전자모듈), Thermal and Hygroscopic Loading(열·습도 복합하중), Autoclave Test(오토클레이브 시험)

초록: 이동용 전자기기에 적용 가능한 유연성 전자모듈이 롤투롤 공정에 의해 개발되었다. 개발된 전자모듈은 모듈 내의 폴리이미드층이 유연성 기판 역할을 하고 그 사이에 동선과 이방성도전필름과 박막 실리콘 칩과 모듈의 봉지재 역할을 하는 접착재료로 구성된다. 개발된 유연성 전자모듈의 신뢰성을 평가하기 위하여 일련의 인증시험을 수행하였다. 시험수행 결과 열·습도 복합하중 조건인 오토클레이브 시험 후에 시험 모듈 내에 박리가 발생하였다. 오토클레이브 시험에서 열과 습기가 유연성 전자모듈에 어떤 응력을 발생시키는지를 범용 유한요소 프로그램으로 연구하였다. 열·흡습 복합하중조건에서 열과 흡습에 의한 영향을 분리하여 상대적으로 평가해 보기 위하여 오토클레이브 조건 중 온도조건에 해당하는 121°C 온도조건 만을 적용하여 해석을 별도 수행하고 두 결과를 비교하였다. 또한 비교 해석결과를 바탕으로 유연성 전자모듈의 고장메커니즘을 추정하였다.

Abstract: A bendable electronic module is developed. In this module, thin silicon electronic chips are embedded in a polymer-based encapsulating adhesive between flexible copper-clad polyimide layers. During the qualification test of a harshly thermal-hygroscopic complex loading condition, delaminations occur inside the module layers. A finite element model is developed for the module. To investigate the effect of hygroscopic stress on delamination, the results of the thermal and thermal-hygroscopic loads are compared. The analysis results reveal that the hygroscopic effect more strongly affects delamination than does the thermal effect. The potential failure mechanisms of the module are investigated based on the stress analysis.

1. 서론

전자제품의 융합화와 휴대성에 대한 요구 증가에 따라 전자부품의 소형화와 고집적화에 대한 요구도 계속적으로 증가하고 있다. 최근에는 유연성 있는 전자제품의 필요성에 따라 유연 인쇄회로기판, 플렉서블 디스플레이 등 유연성 전자부품에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

본 논문에서는 최근에 연구·개발된 유연성 전자모듈⁽¹⁾에 대한 구조해석을 온도와 습도의 복합

환경하중 하에서 수행하였다. 개발된 전자모듈은 인증시험 중 오토클레이브 시험에서 고장이 발생하였다. 오토클레이브 시험은 고온·고습·고압조건에서 수행된다. 본 연구에서는 오토클레이브 시험에서 열과 습기가 유연성 전자모듈에 어떤 응력을 발생시키는지를 범용 유한요소 프로그램으로 해석을 수행하고 해석결과를 바탕으로 고장메커니즘을 추정하였다.

2. 유연성 전자모듈의 인증시험

개발된 유연성 전자모듈은 세 차례에 걸쳐 설계가 개선되었으며 최신 설계 형상은 Fig. 1과 같다.

† Corresponding Author, cw_han@keti.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

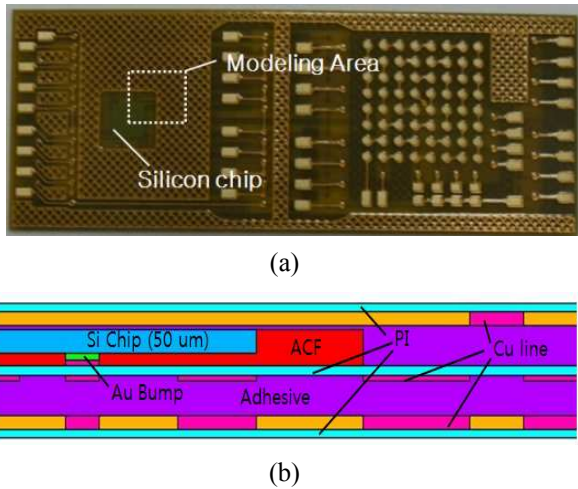


Fig. 1 Developed bendable electronic module (a) and its cross section at silicon chip area (b)

전자모듈 내의 실리콘칩의 두께는 50 μm이다. 모듈 내에는 폴리이미드(Polyimide: PI)층이 유연성 기판 역할을 하고 기판 상하로 접착재료(Adhesive)가 봉지재 역할을 한다. 실리콘 칩에 연결된 골드뎀프(Au bump)는 이방성도전필름(Anisotropic Conductive Film: ACF)의 경화에 의해 동선(Copper line)과 전기적으로 연결된다. 모듈은 동선층이 4번 삽입 되는 4층 구조로 구성된다.

개발된 유연성 전자모듈의 신뢰성을 검증하기 위하여 Table 1에 제시된 일련의 인증시험을 수행하였다. 인증시험은 총 3가지 시험으로 -55°C와 125°C의 온도 조건에서 각 10분씩 반복 수행한 열충격 시험, 85°C, 85%RH 조건에서 수행한 고온고습 시험, 121°C, 100%RH, 2기압 조건에서 수행된 오토클레이브 시험으로 구성되었다. 시험 후 전기적 측정 결과 시험 모듈은 열충격 시험과 고온고습 시험은 고장 없이 인증 시험을 통과하였으나 오토클레이브 시험에서는 다량의 고장이 발생하였다.

오토클레이브 시험에서 고장이 발생한 모듈에 대한 고장분석 결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이 실리콘 칩 주위에서 많은 박리(Delamination)현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 오토클레이브 시험의 조건은 온도와 습도가 동시에 작용하는 121°C, 100%RH, 2기압조건이었다. 고장에 대한 메커니즘을 분석하기 위하여 주요 박리가 발생한 실리콘 칩 주위에 대해서 1/4 대칭 유한요소모델을 Fig. 3에 예시된 바와 같이 구성하였다.

Table 1 Summary of qualification test results

Tests	Conditions	Times	Results
Thermal Shock	-55°C, 10min. /125°C, 10min.	400 cycles	Pass
Damp heat	85°C, 85%RH	96 hours	Pass
Autoclave	121°C, 100%RH, 2atm	96 hours	Fail

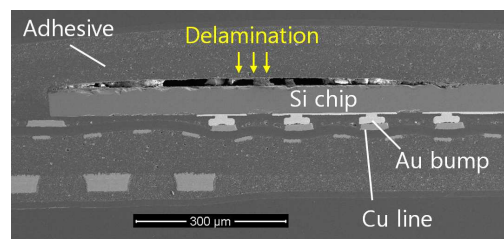


Fig. 2 An example of failure analysis after the autoclave test

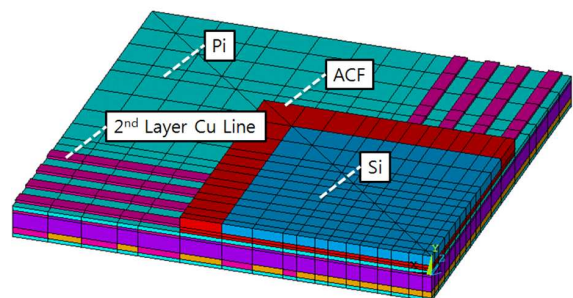


Fig. 3 Finite element model internal view of the bendable module

3. 유연성 전자모듈의 구조해석

2.1 재료 물성치

열·흡습 하중 하에서 모듈의 구조해석을 위해서는 모듈의 각 재료별 물성치 데이터가 필요하다. 오토클레이브 시험상태에서 발생하는 비선형의 응력-변형률 관계를 모사하기 위해서는 소성 영역까지 포함하고, 온도 별로 구분된 물성치 데이터가 필수적이다. 또한 각 재료에 대한 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)와 폴리머 계열 재료들에 대한 흡습팽창계수(Coefficient of Hygroscopic Expansion, CHE)가 요구된다. 필요한 물성치 데이터는 실험⁽⁶⁾과 참고문헌^(2-5,7)으로부터 확보하였다. Fig. 4와 Table 2에 사용된 물성치가 정리되어 있다.

저자의 이전 연구결과⁽⁸⁾에 의하면 오토클레이브 시험조건에서 유연성 전자모듈 내 폴리머 재료인

Table 2 Summary of CTE and CHE properties

Material	CTE at autoclave condition	CHE at autoclave condition	Ref.
PI	20e-6/°C	0.035/wt%	(2)
ACF	260e-6/°C	0.005/wt%	(3-5)
Adhesive	402e-6/°C	0.046/wt%	(3),(6)
Cu	18.5e-6/°C	-	(7)
Au	14.6e-6/°C	-	(7)
Si	2.49e-6/°C	-	(7)

폴리이미드, 접착재료, 이방성도전필름 세가지 재료들은 실험시간(96시간) 대비 짧은 시간(30분 정도) 안에 습기흡수가 포화상태가 된다. 이 연구결과에 근거하여 본 연구의 열·흡습 구조해석은 121°C 온도조건과 폴리머 재료의 습기 포화상태에서 해석을 수행하였다.

각 재료의 오토클레이브 조건(121°C, 2atm, 100%RH)에서 포화습기량(C_{sat})은 다음과 같이 구해진다.⁽⁸⁾

$$C_{sat} = S \times RH \times P_{sat} \quad (1)$$

여기서 S 는 해당온도에서의 흡습계수(Solubility), RH 는 상대습도, P_{sat} 는 포화증기압이다. 오토클레이브 조건에서 P_{sat} 는 2 atm (= 0.202650MPa)이고, S 값은 **Table 3**에 정리되어 있다. 각 재료별 포화습

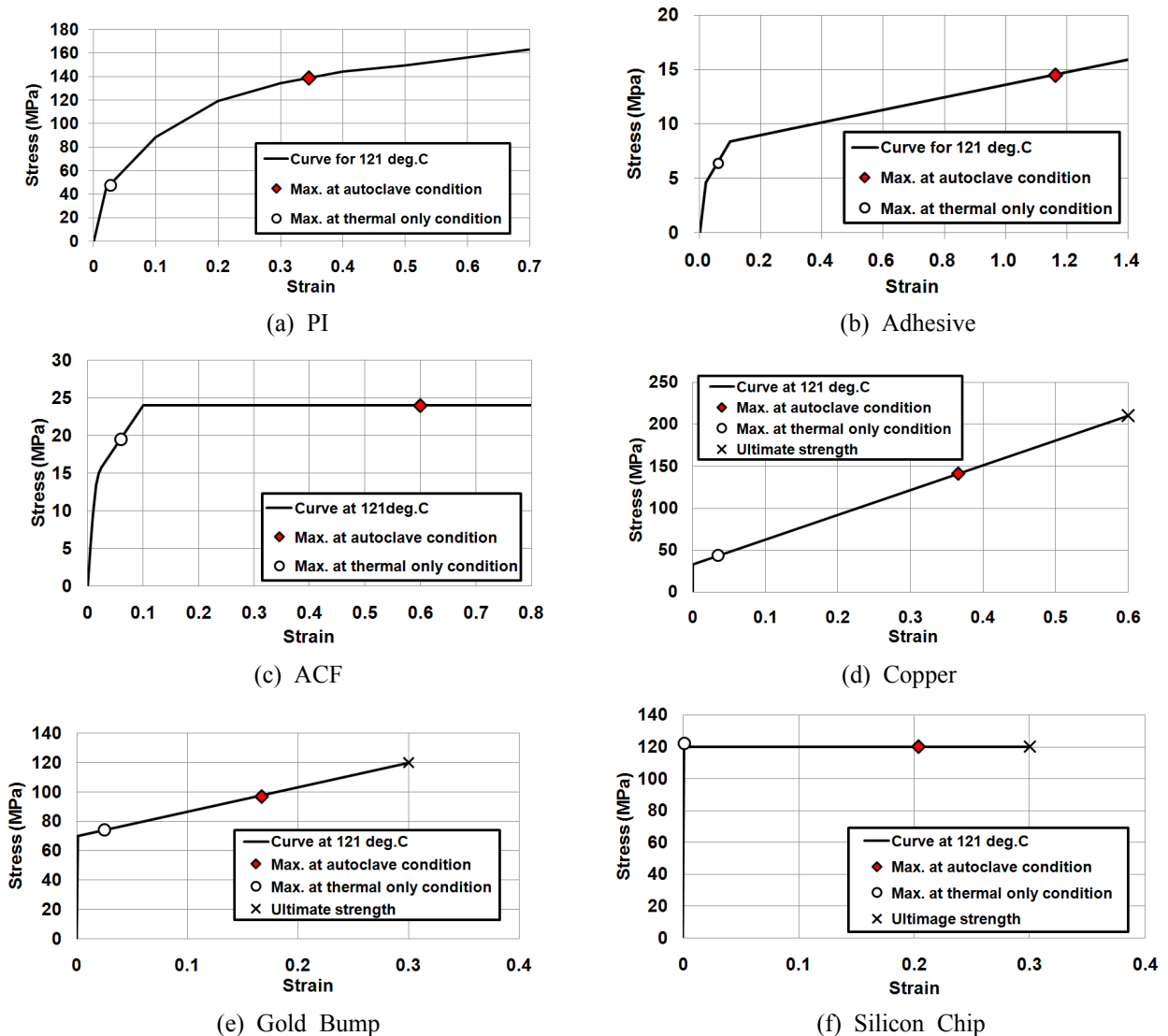


Fig. 4 Stress-strain plots at each material and maximum stress-strain points at both conditions

Table 3 Solubility and saturated concentration of the materials at 121°C⁽⁸⁾

	PI	Adhesive	ACF
$S(1/\text{MPa})$	3.09E-01	1.45E-01	1.61E-01
$C_{sat} (\text{wt}\%)$	6.26	2.94	3.26

Table 4 Deformation analysis results at both loading conditions

Loading condition	Max. Deformation (mm)		
	Thickness dir.	In-plane dir. (x)	In-plane dir. (z)
Autoclave Test (A)	0.81	0.37	0.35
Thermal only (B)	0.023	0.009	0.007
Ratio (A/B)	35	41	50

기량은 폴리이미드는 6.26 wt%, 접착재료는 2.94 wt%, 이방성도전필름은 3.26 wt%로 계산된다.

오토클레이브 조건에서의 열·흡습 복합 하중에 대한 구조해석은 참고문헌 [9]에서 제시한 열 하중은 ANSYS의 Temperature Loading 모듈을 이용하고 흡습 하중은 ANSYS의 Fluence Swelling 모듈에서 지수값을 1로 지정하는 방법을 사용하였다. 또한, 열·흡습 하중조건에서 열과 흡습에 의한 구조영향을 분리하여 상대적으로 평가해 보기 위하여 오토클레이브 조건 중 온도조건에 해당하는 121°C 온도조건만을 적용한 단일 하중 조건에 대하여 별도 해석을 수행하였다.

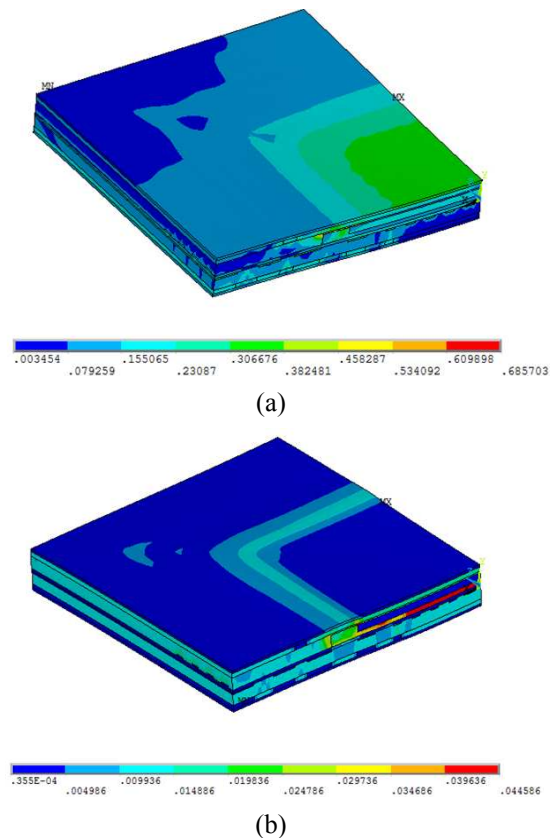
2.2 구조해석 결과

먼저 열·흡습 복합하중 조건과 열 단일하중 조건에서의 대변형해석결과를 각 방향별로 분석하였다. 해석결과 **Table 4**에 제시된 것과 같이 모든 방향에서 복합하중 조건에서의 최대 변형량이 열 단일하중 조건에서의 최대 변형량 보다 35~50 배 이상 크고, 변형률 패턴 또한 **Fig. 5**에 나타난 것과 같이 두 하중조건에서의 동일하지 않은 것으로 분석되었다. 이는 모듈의 변형에 복합하중의 흡습 영향이 열에 의한 영향보다 주도적이며 그 영향도 상이하게 적용됨을 유추할 수 있다.

또한 각 재료별로 나타나는 최대 응력·변형률 수치를 **Fig. 4**에 응력·변형률 곡선 위에 표시하였다. 복합하중 조건에서의 최대 변형률은 단일하중 조건에서 보다 모든 재료에서 수십 배 크을

Table 5 Summary of maximum equivalent strain results at each material

Material	Max. Von-Mises Strain		Ratio (A/B)
	Autoclave Test Condition (A)	Thermal Only Condition(B)	
PI	0.346	0.027	13
Adhesive	1.162	0.061	19
ACF	0.600	0.060	10
Chip	0.204	0.001	204
Copper	0.366	0.035	10
Bump	0.167	0.025	7

**Fig. 5** Equivalent strain contour plots at (a) autoclave and (b) thermal load only conditions

알 수 있다. 구체적인 수치는 **Table 5**에 정리되어 있다. 이로부터 오토클레이브 조건에서 모듈의 변형률 발생에는 흡습의 영향이 열에 의한 영향보다 주도적임을 확인할 수 있다.

4. 유연성 전자모듈의 고장메커니즘 추정

구조해석 결과로부터 열·흡습 복합하중 조건에

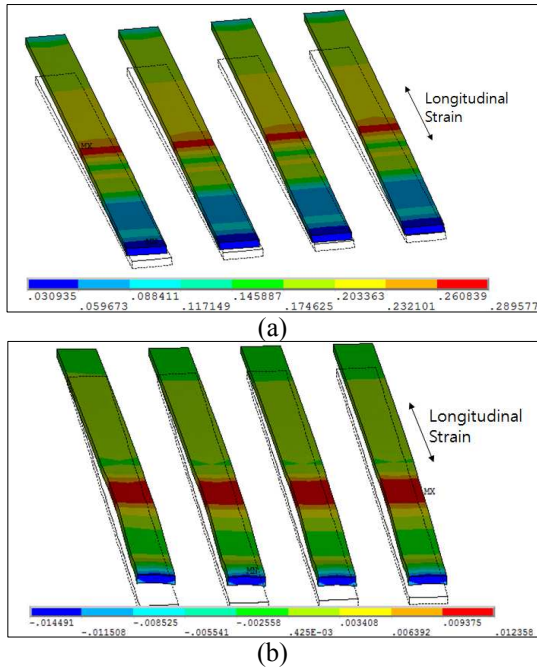


Fig. 6 Longitudinal strains of copper lines at (a) autoclave and (b) thermal load only conditions

서 열 단일하중 조건 대비 현저히 응력이나 변형률이 늘어나는 위치와 조건을 상세히 분석하여 다음과 같이 고장메커니즘을 추정하였다.

먼저 열·습도 복합하중 조건과 열 단일하중 조건 조건에서 동선에 동선 길이 방향으로 발생하는 길이방향 변형률을 상호 검토하였다. 검토결과 Fig. 6에 나타난 바와 같이 복합하중 조건에서 열 하중만 주어진 조건 보다 23배 정도(0.2896 vs. 0.0124)의 큰 길이방향 변형률이 발생하였다. 이때 최대 변형률이 발생하는 위치는 이방성도전필름이 끝나고 접착재료가 시작되는 부위로 이 부분에서 동선의 박리가 발생할 가능성이 크다고 예상된다.

둘째로는, 모듈 내 접착재료의 과도한 CHE 값에 의해 오토클레이브의 복합하중 조건에서는 모듈이 121 °C 온도만 가한 단일하중 조건보다 상대적으로 좌우 팽창량이 크다. 이로 인해 골드 범프에 가해지는 주응력(Principal Stress) 방향이 두 조건에서 상이하게 나타난다. 아래 Fig. 7에 나타난 바와 같이 복합하중 조건에서는 골드 범프에 주응력의 길이방향으로 존재하나, 열 단일하중 조건에서는 두께 방향으로 나타난다. 또한 1차 주응력의 크기도 복합하중 조건이 2배 이상 크다. 이로부터 복합하중 조건에서 골드 범프와 골드 범프 상하에 위치하는 동선이나 실리콘 칩 간에 Mode II 형태의 크랙으로 유도되는 박리 현상이 발생할 것으로 유추할 수 있다.

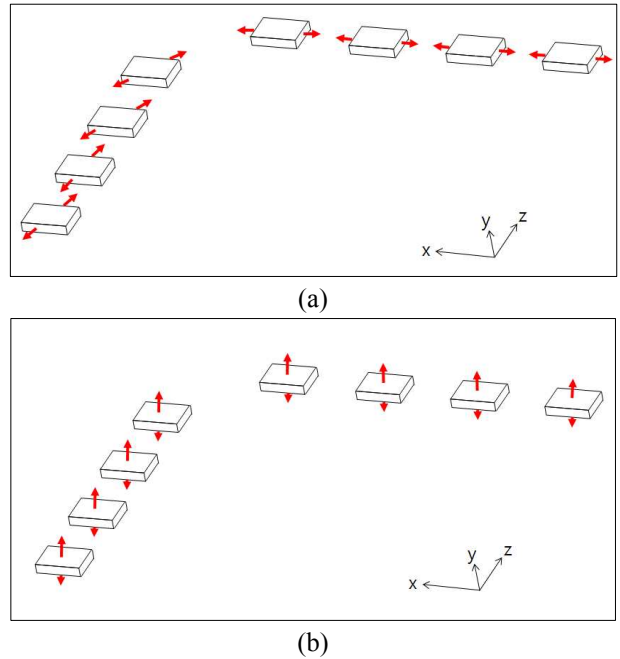


Fig. 7 1st Principal stress directions of gold bumps at (a) autoclave and (b) thermal load only conditions

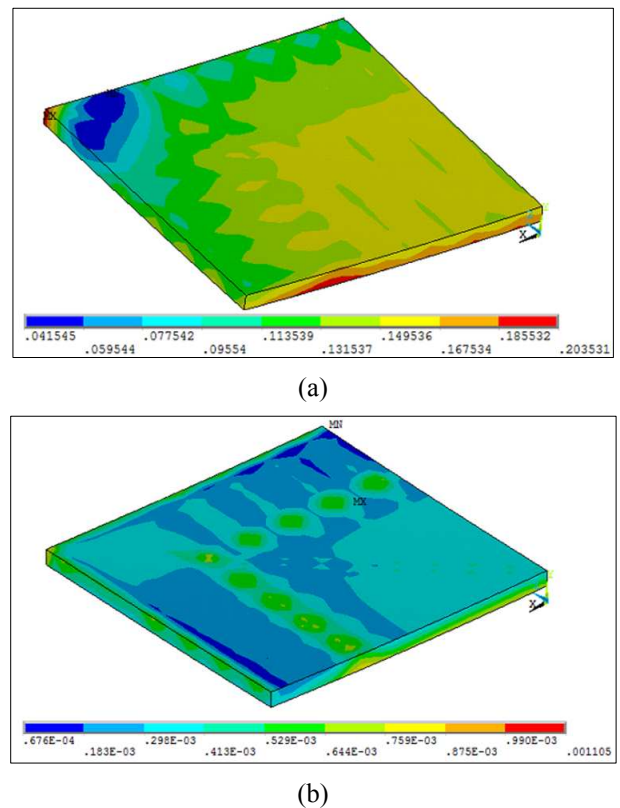


Fig. 8 Equivalent stresses of silicon chip at (a) autoclave and (b) thermal load only conditions

마지막으로 오토클레이브 복합하중 조건과 열 단일하중 조건에서 대비되어 나타나는 차이는 실

리콘 칩에서이다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 복합하중 조건에서 실리콘 칩 영역의 급격한 변형률 증가가 분석되었다. 이 변형률 변화는 실리콘 칩의 끝단 모서리 부분에서 발생하는 데 이 변형률은 칩 평면방향으로의 전단변형률에 기인한다. 국부적으로 발생하는 과대 전단변형률은 Fig. 2의 고장분석 그림에서 제시된 바와 같이 실리콘 칩과 ACF의 박리 현상으로 이어진다.

5. 결 론

본 연구에서는 오토클레이브의 복합하중 시험 조건에서 열과 습기가 유연성 전자모듈에 어떤 응력을 발생시키는지를 범용 유한요소 프로그램으로 해석을 수행하고 모듈의 고장메커니즘을 추정하였다. 추정된 고장메커니즘은

(1) 오토클레이브 복합하중 조건에서 단일하중 조건 보다 23배 정도의 큰 길이방향 변형률이 발생한다. 최대 변형률이 발생하는 위치는 이방성 도전필름이 끝나고 접착재료가 시작되는 부위로 구조적으로 이 부분에서 동선의 박리가 발생할 가능성이 크다.

(2) 유연성 모듈이 접착재료의 과도한 CHE 값에 의해 오토클레이브 조건에서 좌우 팽창량이 큼을 알 수 있고, 이로부터 복합하중 조건에서 골드범프와 상하 동선과 실리콘 칩간에 Mode II 유형의 크랙으로 유도되는 박리 고장이 발생할 수 있다.

(3) 복합하중 조건에서 급격한 변형률 증가가 실리콘 칩의 끝단에서 발생하는 데, 이는 평면방향의 전단변형률에 기인한다. 이렇게 국부적으로 발생하는 전단변형률은 칩과 ACF의 박리로 이어진다.

후 기

본 연구는 지식경제부 청정제조기반 산업원천 기술개발사업(10031768) 및 지식경제 R&D 전략 기획단(2011T100100037)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Wang, G., Cho, Y., Hong, S., Kim, J., Choi, W., Kim, J., Ryu, J., Hong, W. and Oh, C., 2010, "Active-Device-Embedded Bendable Electronic Module," *12th International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP 2010)*, Singapore.
- (2) Dupont, 2012, "Summary of Properties for Kapton Polyimide Films," Retrieved at Sep. 2012 from www2.dupont.com/Kapton/en_US/assets/downloads/pdf/summaryofprop.pdf
- (3) Yoon, J., Kim, I. and Lee, S., 2009, "Measurement and Characterization of the Moisture-Induced Properties of ACF Package," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 131, 021012.
- (4) Liu, J., 1999, *Conductive Adhesives for Electronics Packaging*, Electrochemical Publications, UK.
- (5) Chung, C. and Paik, K., 2009, "The Effects of the Degree of Cure of Anisotropic Conductive Films (ACFs) on the Contraction Stress Build-up of ACFs and ACF Joints Stability for Chip-On-Flex (COF) Applications," *59th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 161-167.
- (6) Oh, C., Wang, G., Kim, J. and Hong, W., 2010, "Mechanical Properties of Adhesive Material with Various Temperatures for Bendable Embedded Module," *2010 Fall Proceedings of the KWS Conference*, p. 39.
- (7) www.matweb.com
- (8) Han, C., Oh, C. and Hong, W., 2012, "Moisture Diffusion Analysis for Bendable Electronic Module Under Autoclave Test Condition," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36. No. 5, pp. 523~528.
- (9) Yoon, S., Jang, C. and Han, B., 2008, "Nonlinear Stress Modeling Scheme to Analyze Semiconductor Packages Subjected to Combined Thermal and Hygroscopic Loading," *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 130, 024502.