

전도성 접착제의 열경화 응력에 대한 해석

Thermal Ratchetting of the Conductive Adhesives Joints Subjected to the Thermal Cycles

박주혁, 서승호*

*세종대학교 기계공학과

Abstract

When a thermoset conductive adhesive joints are subjected to the thermal cycles, the thermal stresses are developed around the joints. Most of in-plane, bi-axial components of these residual stresses induces large tensile peel stresses and weakens adhesive joints. Also these stresses vary with thermal cycles, and result in thermal fatigue loading and debonding propagation. In this study, the thermal ratchetting effect in conductive adhesive joints are evaluated by the finite element analysis with the viscoelastic material model. In order to Investigate the relationship between thermal ratchetting and glass transition temperature, the mathematical material model has been developed experimentally by dynamic mechanical analysis. These material models are implemented to the finite element analysis with thermal loading cycles. And the stress profiles around the conductive adhesive joints are calculated. It has been observed that the thermal ratchetting occurs when the maximum temperature of thermal cycles is above the glass transition temperature. The peel and shear stress components increase as the thermal loading time increases. This will contributes to thermal fatigue fracture of the joints.

1. Introduction

과거 수십 년 동안 전자 업계에서는 열경화성 고분자 전도성 접착제에 대한 개발이 이루어졌으며 지금도 새로운 제품이 시장에 소개되고 있는 실정이다. 현재는 손쉽게 표면 실장을 위한 전도성 접착제를 구입할 수 있는 정도까지 되어 널리 많은 분야에서 사용되고 있다. 이러한 개발로 인하여 통상적으로 전자 제품의 제조에 사용하던 솔더와 리드를 이용한 부품의 접착형태와는 다른 전도성 접착제를 사용한 리드가 없는 간편하고 환경친화적인 표면실장 방법에 대한 연구가 이루어져왔다.

이러한 전도성 접착제를 사용하여 조립된 전자 부품이 실제 사용을 하는 경우 기기에서 발생하는 열에 의하여 반복되는 열 하중 상태를 경험하게 된다. 이러한 형태로 정상적으로 열응력이 발생하면서 동시에 정상 응력의 방향으로 비탄성 변형이 누적되는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 열 래치팅(thermal ratchetting)이라 하며 반복 열응력, 반복수 및 그 반복 속도 등에 의존한다고 알려져있다.

일반적으로 열 하중에 의한 열응력에 의하여 접합부에서 발생하는 Fig. 1와 같은 평면 인장 2축 응력은 커다란 값을 가지며 두 개의 이종 재료로 접합된 부위를 벗겨내는 형태로 작용을 하게 되어 접합력을 약하게 한다. 또한 반복되는 열 하중에 의한 응력은 열 래치팅 현상에 의하여 매번

다른 형태로 발생하게 되며 접합부의 박리 현상을 발생시키게 된다.

본 연구에서는 이러한 현상에 대한 열경화성 고분자 접착제의 물성치가 미치는 영향을 조사하여 반복 열 하중에 의한 열 래치팅 현상을 조사하였다. 이러한 연구를 위하여 열경화성 고분자 접착제에 대한 물성치를 열/기계적으로 구하여 이를 수치적인 모델로 작성을 하여 유한요소법을 사용하여 접합부에 발생하는 응력을 계산하였다. 이러한 응력을 계산함으로써 재료의 물성치가 전도성 접착제를 사용한 접합부에 대한 신뢰성 평가를 위한 자료를 제공하고자 한다.

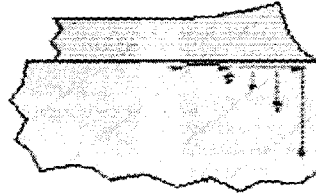


Fig. 1. Stresses build-up around the joint area.

2. Material Characterization

본 연구에 사용된 전도성 접착제는 80%의 은이 함유된 에폭시 계열의 고분자 화합물로서 열/기계적 특성을 구하여 유한요소법에 적용이 가능한 수학적 물성치 모델을 만들었다. 이를 위하여 Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)를 사용하여 비정질 고체인 접착제가 무른 상태에서 점성이 있는 상태로 변하는 온도 영역의 중심 즉 비체적 대 온도 곡선의 구배가 급격히 변화하는 유리 전이 온도(T_g)를 구하였다. 또한 일반적으로 고분자 화합물의 탄성계수는 시간과 온도의 함수로 주어지는 점탄성재료로 알려져 있다. 본 연구에서는 비틀림 방법을 사용하는 Rheometric사의 RMS-800 dynamic spectrometer를 사용하여 크기 $50mm \times 12mm \times 1.7mm$ 의 시편을 제작하여 dynamic frequency/temperature sweep mode 방법을 사용하여 storage shear modulus, G' 과 loss shear modulus, G'' 의 합으로 표시되는 동 전단 계수(dynamic shear modulus, G^*)를 구하였다. 사용한 주파수는 $0.1 \sim 100$ rad/sec이고, 온도의 범위는 $85 \sim 220^\circ C$ 를 $15^\circ C$ 간격으로 증가시켜 가면서 측정을 수행하였다. 0.1%의 변형률을 모든 실험에 적용을 하였다. 일반적으로 전단 이완 계수 중 G' 의 값이 G'' 에 비하여 상대적으로 크므로 전단 계수 값은 한 후 한 재료는 응력 이완 현상을 보여주는데 이는 Fig. 2와 같이 스프링과 대쉬 포트를 사용한 Maxwell 요소와 완화 시간을 사용하여 식 (1)과 같이 Prony series 형태로 유한 요소법에 적용된다.

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^N E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (1)$$

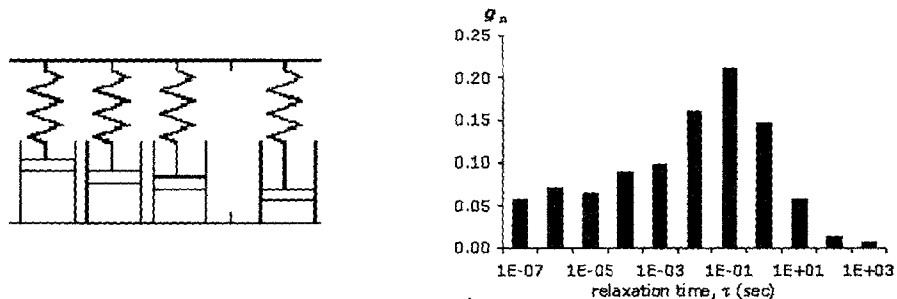


Fig. 2. Maxwell elements in parallel and relaxation time vs. shear modulus.

Fig. 3은 DMA 측정을 통하여 얻어진 storage shear modulus를 보여주고 있다. Fig. 4는 유리

전이 온도를 찾기 위한 실험 결과를 보여주고 있다. 본 측정에서 유리 전이 온도, T_g 는 125°C로 측정되었다. 본 연구에 사용된 Prony series는 13개의 Maxwell 요소를 사용하였으므로 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G(t) = G_0 \left(g_e + \sum_{i=1}^{13} g_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (2)$$

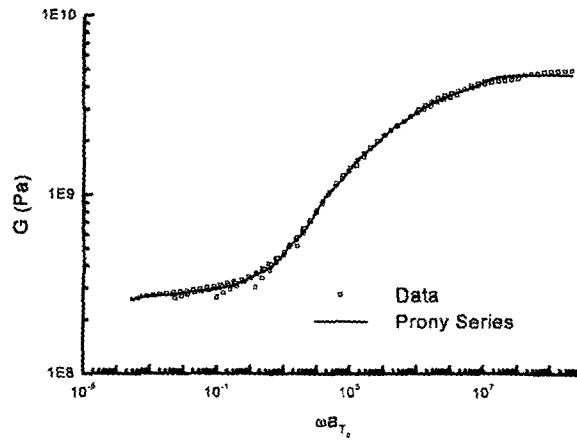


Fig. 3. Storage shear modulus G' Master Curves at reference temperature, 125°C.

점탄성 재료의 이완 계수는 시간과 온도의 함수로 주어진다. 이러한 재료의 특성을 고려하여 시간-온도 중첩의 원리를 이용하기 위하여 master curve를 작성하기 위하여 본 연구에서는 온도 전위 함수(temperature shift function), $a_T(T)$ 를 측정하였다. 기준 온도, T_0 에서 온도 전위 함수는 William-Landel-Ferry의 식으로 (3)의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log a_{T_0} = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (3)$$

이때 C_1 과 C_2 는 온도 값으로 기준 온도 $T_0 = 125^\circ\text{C}$ 에서 각각 26.0, 129.8°C로 주어진다.

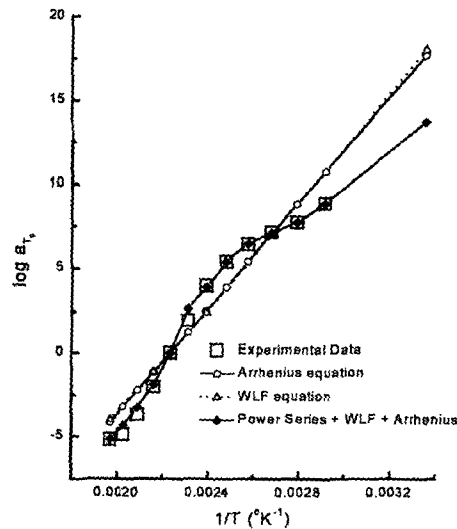


Fig. 4. Shift functions in terms of various formulations.

3. Finite Element Analysis

반복되는 열 하중에 의하여 접합부에서 발생하는 응력을 계산하기 위하여 Fig. 5와 같이 chip capacitor를 금도금된 알루미늄 판에 전도성 접착제를 사용하여 접착시킨 2차원 유한요소 모델을 구성하였다. 이때 chip capacitor와 알루미늄 판은 선형 탄성재료로 가정을 하였고, 전도성 접착제는 2절에서 제안된 13개의 Maxwell 요소로 구성된 Prony series의 선형 점탄성 모델을 사용하였다. 주어진 모델은 축대칭이므로 Fig. 5에서 보는 바와 같이 1/2 모델을 사용하였다.

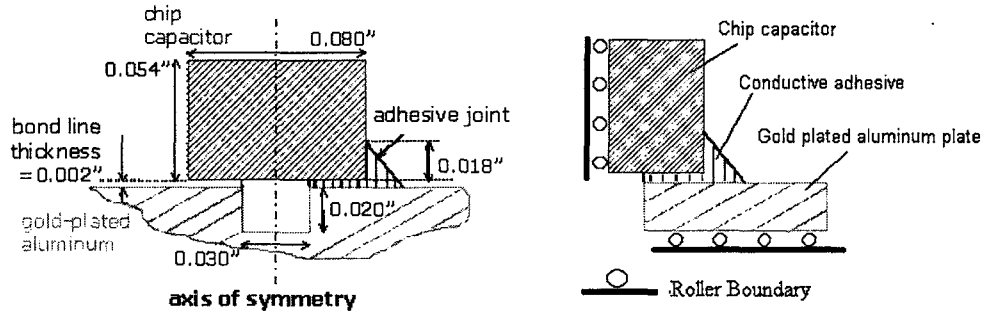


Fig. 5. Schematic diagram for finite element analysis.

해석을 isoparametric 4 절점 요소를 사용하였으며 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 강체 모드를 제거하기 위하여 금도금 알루미늄 판의 밑모서리의 질점의 모든 자유도를 제거하였다. 열 하중 조건은 Fig. 6과 같이 -50°C 에서 150°C 로 변화하며 1 시간을 주기하였다.

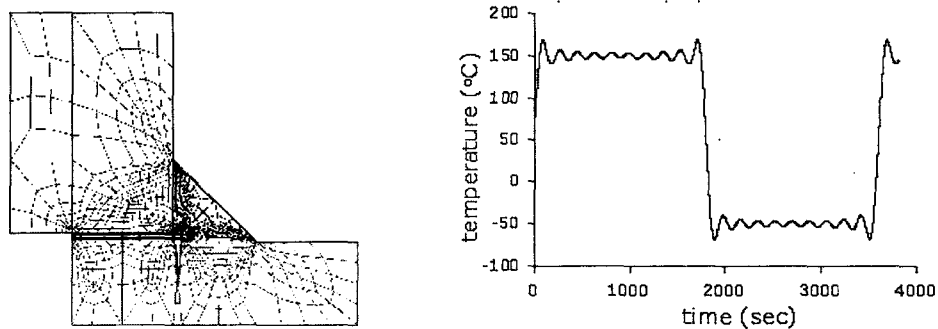


Fig. 6. Finite element model and thermal loading curve.

Table 1은 유한요소 해석에 사용된 전도성 접착제, chip capacitor와 알루미늄 판의 물성치를 보여주고 있다. Table에서 보는 바와 같이 열팽창계수의 차이로 인하여 반복 열 하중이 가해지면 접합부에서 열응력이 발생한다.

Table 1. Elastic constants and CTE of constituents. (¹Elastic model, ² Viscoelastic model)

Components	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	CTE ($10^{-6} K$)
Chip capacitor ¹	190	0.278	2.33
Gold plated aluminum ¹	144.83	0.31	4.3
Conductive adhesive ²	viscoelastic	0.25	40

4. Results and Discussion

반복 열 하중 초기에 발생하는 peel stress 수직 응력 성분(σ_{11} , σ_{22})과 전단 응력 성분(τ_{12})의 분포는 Fig. 7과 같이 계산되었다. Chip capacitor와 전도성 접착제가 만나는 코너 부위에서 가장 큰 응력 값이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 정량적인 해석 외에도 기하학적 불연속이 생기는 접합부에 생기는 응력의 값을 관찰함으로써 접합부에서 생길 수 있는 파괴를 예측할 수 있다.

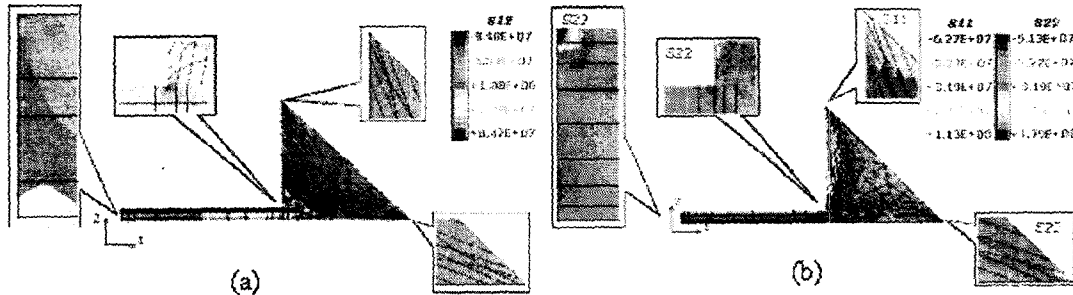


Fig. 7. Stress distribution at $T=50^{\circ}\text{C}$ after 3 thermal cycles ($T_g=180^{\circ}\text{C}$).

또한 열 래치팅 현상이 생기는 것을 관찰하기 위하여 반복 열 하중을 60회 가하는 동안 가장 큰 응력이 발생하는 코너 부위에서의 열 하중에 의한 peel stress(σ_{22})와 전단응력(τ_{12})을 시간의 함수로 Fig. 8에 표시함으로써 유한요소 해석을 통하여 열 래치팅 현상을 관찰할 수 있었다.

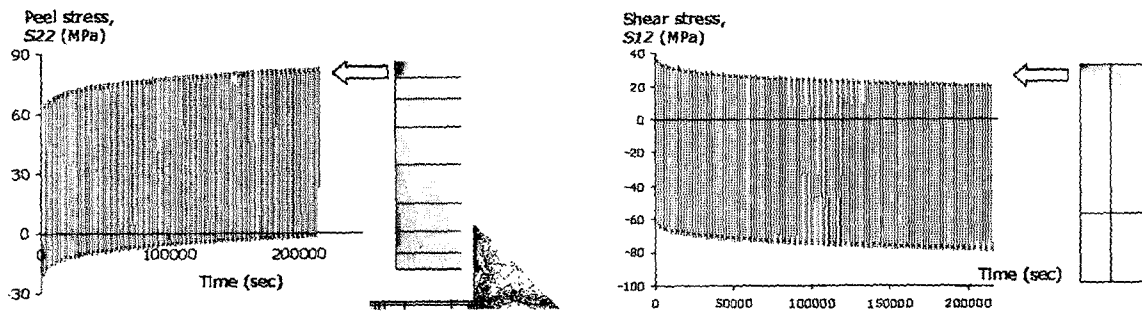


Fig. 8. Thermal ratchetting effects after 60 thermal cycles. ($T_g=190^{\circ}\text{C}$).

또한 유리 전이 온도가 열 래치팅 현상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 열하중의 최대 온도 T_{max} 를 매개변수로 하여 해석을 수행한 결과를 Fig. 9에 표시하였다. 열 래치팅 현상은 열 하중 최대 온도가 T_g 보다 낮으면 발생하지 않음을 알 수 있었고, T_{max} 가 커지면 잔류 응력이 점점 증가함을 알 수 있었다.

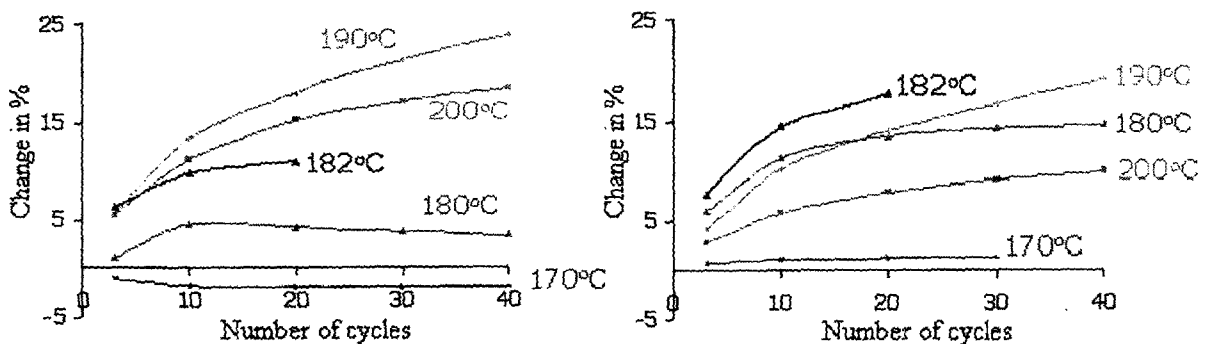


Fig. 9. Stress evolution for different glass transition temperatures.

6. Conclusion

전도성 고분자 접착제에 대한 열/기계적 물성을 DMA 실험을 통하여 측정하였다. 얻어진 점탄성 재료 모델을 유한 요소법에 적용하여 반복 열 하중 조건에서 접합부에 발생하는 응력 분포도를 계산하였으며, 매개변수 법을 사용하여 반복 열 하중의 최대 값과 접착제의 유리 전이 온도가 열 래치팅 현상에 미치는 영향을 알아보았다.

계산 결과에서 재료의 분리를 발생시키는 peel stress와 shear stress는 기하학적 불연속 지점에 집중되며 반복 열 하중의 최대 값이 유리 전이 온도보다 큰 경우에만 열 래치팅 현상을 관찰할 수 있었다. 또한 시간이 지나가면서 peel, shear stress값이 증가하는 것을 관찰할 수 있었고, 이 응력들이 피로의 원인이 됨을 알 수 있었다.

References

- [1] L. Li, Ch. Lizzu, K. Hansoo, I. Sacolick, and J. E. Morris, IEEE Trans. Comp. Hybris, Manufact. Tech., Vol. 16(8), pp. 843-851 (1993)
- [2] J. Liu, R. Rorgren, and L. Ljungkrona, Proc. Surface-mount Appl., pp. 291-302 (1994)
- [3] J. Park, Ph. D. Dissertation, UCLA (1999)
- [4] J. C. Jagt, P. Beris, and G. Lijten, IEEE Tran. on Comp. Pack. and Manuf. Tech., Part B, Vol. 18(2), (1995)