

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.2.245

유리섬유강화 복합재의 점탄성 특성 규명 및 인쇄회로기판 열변형 해석에의 적용

송우진* · 구태원** · 강범수** · 김 정**†

* 부산대학교 부품소재산업협력연구소, ** 부산대학교 항공우주공학과

Characterization for Viscoelasticity of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite and Application to Thermal Warpage Analysis in Printed Circuit Board

Woo-Jin Song*, Tae-Wan Ku**, Beom-Soo Kang** and Jeong Kim**†

* Industrial Liaison Innovation Center, Pusan Nat'l Univ.,

** Dept. of Aerospace Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received October 14, 2009 ; Revised December 8, 2009 ; Accepted December 9, 2009)

Key Words: Viscoelasticity(점탄성), Time-Temperature Superposition(시간-온도 호환), Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite(유리섬유강화 복합재), Finite Element Analysis(유한요소해석), Thermal Warpage(열변형)

초록: 전자기기부품에 적용되는 회로기판의 패키지 공정상에서 가해지는 온도변화에 따른 신뢰성 평가시 발생되는 문제들은, 주로 회로기판을 구성하고 있는 기본 재료들의 열팽창 계수 차이 및 시간의존성 물성에 의해 영향을 받는다. 특히, 인쇄회로기판 내부 회로층 사이에서 절연 역할을 수행하는 유리섬유강화 복합재료와 같은 수지 몰딩 고분자 재료는 온도에 따른 물성변화 뿐만 아니라, 변형 및 하중이 가해지는 시간에 대한 물성변화도 고려해야 하는 점탄성 성질을 나타낸다. 본 논문에서는 인쇄회로기판에 사용되는 주요 고분자 재료인 유리섬유강화 복합재의 시간 및 온도에 따른 점탄성 특성을 규명하기 위하여, 단축인장 모드의 응력완화 시험과 크리프 시험을 각각 수행하였다. 또한, 고분자 재료 점탄성 물성의 영향성을 파악하기 위하여, 유한요소해석을 이용한 인쇄회로기판의 예비가열 공정 상에서 가해지는 온도변화에 따른 열변형을 평가하였다. 이러한 해석결과를 바탕으로, 인쇄회로기판과 같이 고분자재료를 사용하는 전자회로 구조물의 수치해석 기반의 열변형 예측시 점탄성 물성의 고려 필요성을 검증하였다.

Abstract: The reliability problems of flip chip packages subjected to temperature change during the packaging process mainly occur due to mismatches in the coefficients of thermal expansion as well as features with time-dependent material properties. Resin molding compounds like glass fiber reinforced epoxy composites used as the dielectric layer in printed circuit boards (PCB) strongly exhibit viscoelastic behavior, which causes their Young's moduli to not only be temperature-dependent but also time-dependent. In this study, the stress relaxation and creep tests were used to characterize the viscoelastic properties of the glass fiber reinforced epoxy composite. Using the viscoelastic properties, finite element analysis (FEA) was employed to simulate thermal loading in the pre-baking process and predict thermal warpage. Furthermore, the effect of viscoelastic features for the major polymeric material on the dielectric layer in the PCB (the glass fiber reinforced epoxy composite) was investigated using FEA.

- 기호설명 -

1. 서 론

- α : 열팽창계수
- E : 탄성계수
- $E(t)$: 응력완화계수
- $J(t)$: 크리프 컴플라이언스
- α_T : 가속계수

전자기기부품에 대한 기계적 거동특성 및 운영신뢰성 평가에 대한 실질적인 수치해석기법 적용에는, 실제품 설계 및 제작자들이 용이하게 적용할 수 없는 복잡한 구성관계들이 요구된다. 특히, 각종 전자기기에 사용되는 회로기판들은 다양한 특성의 재료들이 두께 방향으로 적층되어 복합적으로 사용된다. 이로 인해, 일반적으로 구조해석 등에 적용되는 유한요소

† Corresponding Author, greatkj@pusan.ac.kr

해석기법에 사용되는 단순 탄성재료 가정은 실제 구조물의 변형거동을 적합하게 묘사하지 못하게 된다. 특히, 인쇄회로기판 내부 회로층 사이에서 절연 역할을 수행하는 유리섬유강화 복합재료와 같은 수지(Resin) 몰딩 고분자 재료는 온도에 따른 물성변화 뿐만 아니라, 변형 및 하중이 가해지는 시간에 대한 물성변화도 고려해야 하는 점탄성 성질을 나타낸다.

일반적으로 고분자 재료를 이용한 IC 패키지에 대한 수치해석에서, 구성하는 모든 재료에 대한 점탄성 성질을 무시하고 탄성체로 가정하여 변형거동 및 응력해석을 수행한다. 그러나, 최근 들어 구성재료 중 고분자 재료의 점탄성 성질을 고려한 연구가 진행되고 있다. Lee 등^(1,2)은 열하중과 습기 중에 존재하는 불순물의 영향을 고려한 기계적 하중 하에서 고분자 재료를 이용한 IC 패키지의 점탄성 거동을 예측하고, 파괴저항성이 가장 높은 최적의 설계 조건을 검토하였다. Oh 등⁽³⁾은 인쇄회로기판(Printed Circuit Board)의 미소 열변형을 측정하기 위한 광학 시스템을 구성하고 전체적인 변형과 국부적인 변형등을 측정하여 유한요소해석 결과와 비교하였다. 그리고, Choi 등⁽⁴⁾은 플립칩 패키지의 온도변화에 따른 유한요소 비선형해석을 수행하고, 변형거동 예측에 대한 해석시 적용된 유한요소해석모델의 영향성을 고찰하였다. Zhu 등⁽⁵⁾은 인쇄회로기판 내 적용된 유리섬유강화복합재의 국부적 유한요소모델을 통해 점탄성 물성의 영향성을 검토하였으며, Oliveira 등⁽⁶⁾은 복합재료의 다양한 시험결과에 대한 이론적, 수치적 해석으로의 적용에 대한 기본 연구를 수행하였다. Fisher 등⁽⁷⁾은 미소 유한요소모델을 기반으로 복합재의 기본 물성을 예측하는 이론적 모델에 대하여 연구를 수행하였다. 그리고, Yeung 등⁽⁸⁻¹⁰⁾은 고분자 몰딩재료 및 언더필 재료에 대한 점탄성 물성을 DMA 장비를 활용하여 평가하였다. 그러나, 이러한 연구결과에서도 실제 인쇄회로기판을 제작하는 현장 및 설계과정에서, 고분자 재료의 점탄성 거동특성 평가에 대한 실질적인 시험방법 및 온도 및 하중이 가해지는 시간에 대한 점탄성 응답특성을 고려하여 설계결과의 변형거동 등을 용이하게 판단할 수 있는 유한요소해석 절차 등에 대한 내용은 부족한 것으로 판단된다. 이에 본 논문에서는 인쇄회로기판에 사용되는 주요 고분자 재료인 유리섬유강화 복합재의 시간 및 온도에 따른 점탄성 특성을 규명하기 위하여, 단축인장 모드의 응력완화 시험과 크리프 시험을 각각 수행하였다. 시험 환경은 온도조건을 고려하기 위하

여 특정 온도영역에서 동일한 시험을 반복하여 진행하였으며, 응력완화 및 크리프 시험에서 측정된 결과에 시간-온도 호환(Time-Temperature Superposition) 기법⁽¹¹⁾을 적용하여 시간의존성 기준선도(Time-Dependent Master Curve)를 도출하고 시간호환 상수(Time Shift Factor)를 정의하였다. 또한, 고분자 재료 점탄성 물성의 영향성을 파악하기 위하여, 유한요소해석을 이용한 인쇄회로기판의 예비가열(Pre-baking) 공정 상에서 가해지는 온도변화에 따른 열변형을 평가하였다. 유한요소해석은 응력완화 및 크리프 시험으로 정의된 각각의 점탄성 특성에 따른 열변형 결과를 비교 검토하였다. 이러한 해석결과를 바탕으로, 인쇄회로기판과 같이 고분자재료를 사용하는 전자회로 구조물의 수치해석 기반의 열변형 예측시 점탄성 물성의 고려 필요성을 검증하였다.

2. 유리섬유강화 복합재 물성 평가

장시간의 온도편차를 사용환경으로 하는 고분자 재료는 온도에 따른 물성변화 뿐만 아니라, 온도하중이 가해지는 시간에 대한 물성변화를 초래한다. 본 논문에서 분석된 유리섬유강화 복합재는 유리전이온도(Glass Transition Temperature)가 약 120°C 정도이며, 주로 인쇄회로기판의 유전층(Dielectric Layer)으로 사용되어지는 것으로 상하 회로층 사이의 절연 역할을 아울러 수행한다. 특히, 인쇄회로기판의 온도하중 환경하의 예비가열공정에 대한 수치해석기법 적용시, 고분자 재료의 다양한 물성 정의가 요구된다. 본 절에서는 이러한 온도하중 환경하에서의 수치해석기법 적용을 위한 유리섬유강화 복합재에 요구되어지는 물성정의에 대하여 정리하였다.

2.1 점탄성 특성인자 규명

본 논문에서는 인쇄회로기판에 사용되는 주요 고분자 재료인 유리섬유강화 복합재의 시간에 대한 물성응답 특성을 규명하기 위하여 크리프 시험 및 응력완화 시험을 각각 수행하였다. 크리프 시험은 일정한 응력을 시료에 인가하여 시간에 따른 변형률변화를 측정하고, 응력완화 시험은 크리프 시험과는 반대로 일정 수준의 변형률을 시료에 인가하여 재료에 발생하는 응력의 변화를 측정한다. 점탄성 물성 규명을 위한 각각의 시험은 TA Instruments 사의 DMA Q800을 이용하여 단축인장모드에서 수행되었다. 일정 응력 및 일정 변형률을 시료에 인가한 후

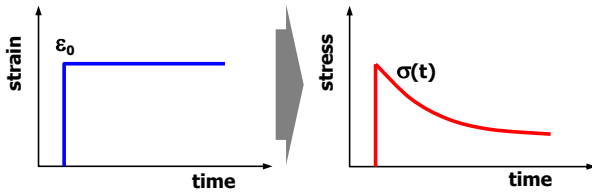


Fig. 1 Strain input and stress output during a stress relaxation test

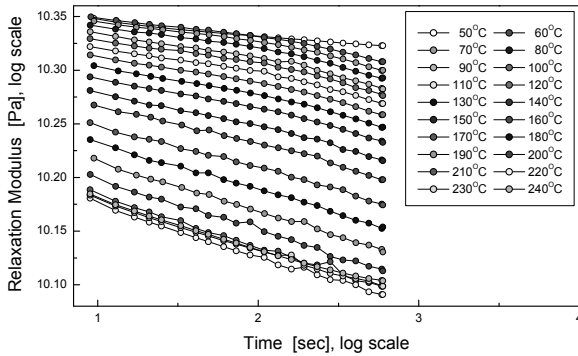


Fig. 2 Uniaxial stress relaxation moduli obtained at 10% strain level as a function of time for the temperature range of 50°C to 240°C

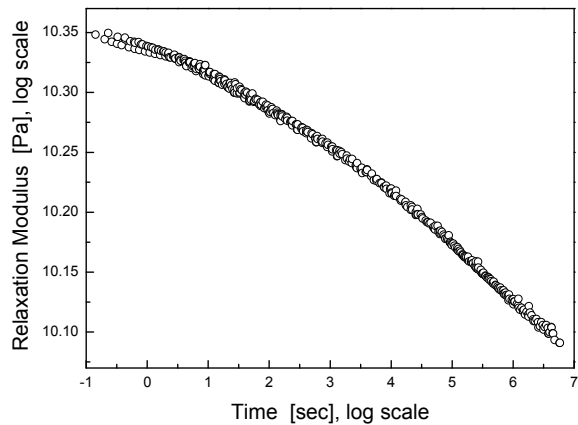


Fig. 3 Stress relaxation master curve obtained at 10% strain level for $T_0=120^\circ\text{C}$

시간에 대한 재료 응답특성 측정은 50 ~ 240°C까지의 온도영역에서 10°C 간격으로 진행하였다. 각각의 온도영역에서 상승된 온도수렴을 위해 10분의 시간동안 시료를 안정시킨 후 각각의 온도수준에서 10분간 재료응답특성을 측정하였다. 이렇게 규명된 유리섬유강화 복합재의 점탄성 물성은 3절에서 유한요소해석기법에 적용되어, 시간에 대한 온도하중 인가 후 발생하는 열변형 예측에 대하여 각각의 물성 영향성을 파악하였다.

2.2.1 응력완화계수

응력완화 시험은 Fig. 1과 같이 고분자 시료에 일정 수준의 변형률을 인가한 후 경과시간에 따른 응력변화량을 측정하는 방식으로 진행되며, 시험된 재료의 점탄성 물성을 응력완화계수로 환산 가능하다. 단축인장 응력완화 시험의 경우, 환산된 응력완화계수, $E(t)$, 는 다음의 식으로 표현 가능하다.⁽¹¹⁾

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} \tag{1}$$

식 (1)의 ϵ_0 는 인가된 일정수준의 변형률을 나타내며, $\sigma(t)$ 는 변형률이 인가된 후 시간에 따라 변화하는 응력함수를 의미한다.

본 연구에서는 앞서 언급한 온도영역에서 10%의 일정 변형률 수준에서 응력완화 시험이 수행되었다. 각 온도영역에서 측정된 시간에 대한 응력 변화값을 이용하여 식 (1)로 환산한 응력완화계수는 Fig. 2에 나타내었다. 시험을 통해 도출된 응력완화계수가 일정 변형률이 가해지는 시간에 따라 응답특성이 달라짐을 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 특히, 110°C에서 130°C 사이 온도영역에서 크게 나타나는데, 이는 시험에 사용된 유리섬유강화 복합재의 유리전이온도(Glass Transition Temperature)가 120°C임을 추측가능하게 한다.

유리섬유강화 복합재와 같이 시간 및 온도에 따라 응답특성이 달라지는 점탄성적 거동은 시간-온도 호환기법을 통하여 해석가능하다. 이 기법은 기준 온도(T_0)를 바탕으로 또 다른 온도영역의 거동특성을 실험적으로 예측하는 방법에 기반을 두고 있으며, 다음 식으로 표현가능하다.

$$E(t, T_0) = E(\alpha_T t, T) \tag{2}$$

여기서, E , t , T 및 α_T 는 각각 응력완화계수, 시간, 온도 그리고 가속계수(Acceleration Factor)를 의미한다. 식 (2)의 물리적 의미는 시간 t 및 온도 T_0 에 측정된 응력완화계수를 바탕으로 시간 $\alpha_T t$ 및 온도 T 의 응력완화계수를 정의 가능하다는 것이다. 일반적으로 유리전이온도 T_0 를 가지는 점탄성 재료의 시간호환 상수(Time Shift Factor, $\log \alpha_T$)는 다음의 Williams-Landel-Ferry(WLF) 식⁽¹¹⁾을 이용하여 근사적으로 예측가능하다.

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

여기서, C_1 , C_2 및 T_0 는 각각 재질상수 및 기

Table 1 Parameters of WLF equation in stress relaxation test

		C_1	C_2
Whole Temperature Range Model		7.186E07	1.964E09
Combined Model	before T_g	1.117E15	4.198E16
	after T_g	1.033E15	2.666E16

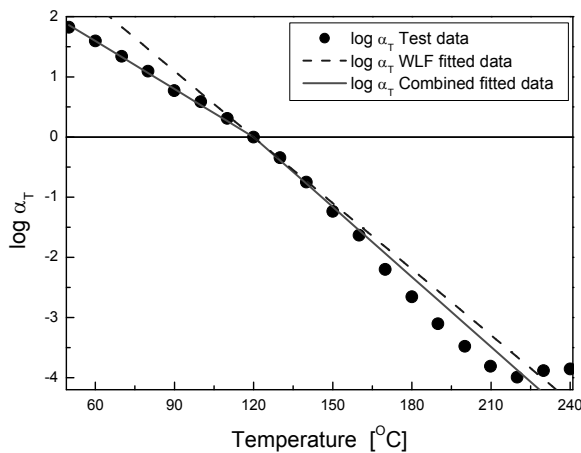


Fig. 4 $\log \alpha_T$ versus temperature for $T_0=120^\circ\text{C}$

준온도를 의미한다. 식 (3)은 가속계수의 로그값에 대한 온도항의 일반화된 식으로서, 본 관계식을 바탕으로 기준 온도(T_0)를 바탕으로 또 다른 온도영역의 거동특성을 실험적으로 예측가능하다. Fig. 2에 나타난 각 온도별로 측정된 응력완화계수로부터 시간호환 상수 기반의 시간-온도 호환기법을 적용하여 재료의 기준선도(Master Curve)를 도출하면 Fig. 3과 같이 도출 가능하다. 식 (3)으로 주어진 WLF 식을 적용하여 기준곡선을 도출하기 위하여 계상된 시간호환 상수는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서는 주어진 온도영역에서 측정된 응력완화계수에 대한 시간호환상수, WLF식을 통한 곡선접합(Curve Fitting)된 시간호환상수 및 유리전이온도를 기준으로 시간호환 상수의 기울기변화 천이에 대하여 WLF 식을 각각 적용하여 곡선접합된 형태의 시간호환상수를 각각 도시하고 비교하였다. 시험에서 도출된 시간호환 상수에 대한 곡선접합을 통해 산출된 WLF 식의 재질상수는 Table 1에 정리하였다. 전체 온도영역에서의 시간호환 상수를 곡선접합한 결과보다 유리전이온도를 기준으로 시간호환 상수의 변화정도를 WLF 식으로 각각 곡선접합하는 것이 시간-온도

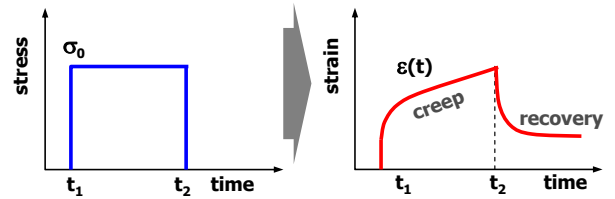


Fig. 5 Stress input and strain output during a creep test

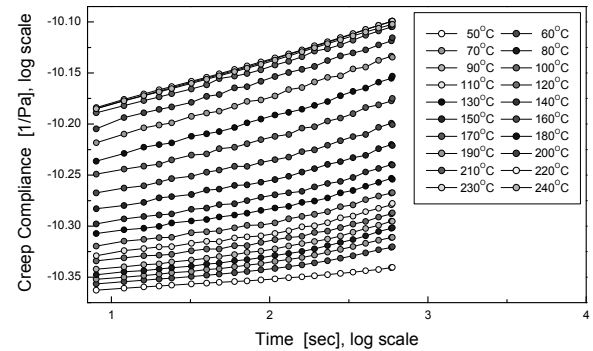


Fig. 6 Uniaxial creep compliance obtained at 20MPa stress level as a function of time for the temperature range 50°C to 240°C

중첩을 통해 도출된 시간호환 상수를 보다 더 정확하게 묘사하고 있음을 알 수 있다. 유리전이온도를 기준으로 시간호환 상수 값의 변화정도가 천이하는 현상은 유리전이온도를 기준으로 아래 온도영역에서는 고분자 재료의 Glass-type 거동이 지배적이며, 유리전이온도를 지날수록 Rubber-like 거동이 우위적으로 나타나기 때문이다.

2.2.2 크리프 컴플라이언스

크리프 시험은 응력완화 시험과는 달리, Fig. 5과 같이 고분자 시료에 일정 수준의 응력을 인가한 후 경과시간에 따른 변형률 변화량을 측정하는 방식으로 진행되며, 시험된 재료의 점탄성 물성을 크리프 컴플라이언스로 환산 가능하다. 단 축인장 크리프 시험의 경우, 환산된 크리프 컴플라이언스, $J(t)$, 는 다음의 식으로 표현 가능하다.

$$J(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} \tag{4}$$

식 (4)의 σ_0 는 인가된 일정수준의 응력을 나타내며, $\epsilon(t)$ 는 응력이 인가된 후 시간에 따라 변화하는 변형률 함수를 의미한다.

Table 2 Parameters of WLF equation in creep test

		C_1	C_2
Whole Temperature Range Model		4.242E07	1.055E09
Combined Model	before Tg	2.261E14	7.179E15
	after Tg	2.238E15	5.319E16

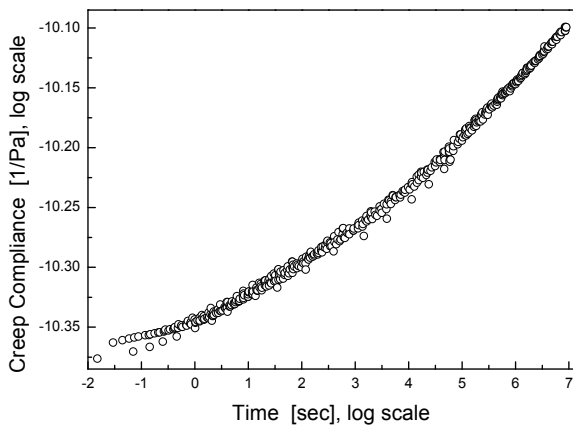


Fig. 7 Creep compliance master curve obtained at 20MPa stress level for $T_0=120^\circ\text{C}$

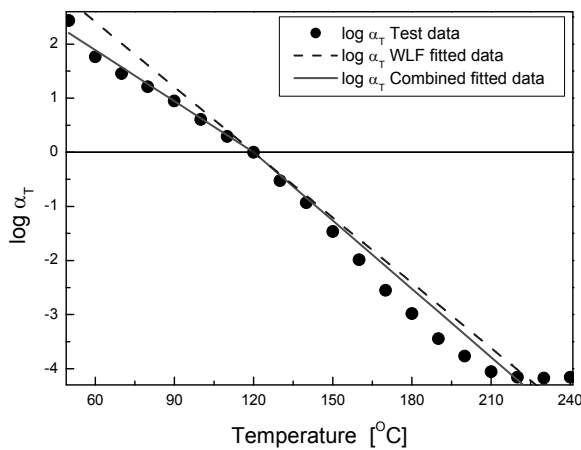


Fig. 8 $\text{Log} \alpha_T$ versus temperature for $T_0=120^\circ\text{C}$

본 연구에서는 앞서 언급한 온도영역에서 20MPa의 일정 응력 수준에서 크리프 시험이 수행되었다. 각 온도영역에서 측정된 시간에 대한 변형률 변화 값을 이용하여 식 (4)로 환산한 크리프 컴플라이언스는 Fig. 6에 나타내었다. 시험을 통해 도출된 크리프 컴플라이언스가 일정 응력이 가해지는 시간에

따라 응답특성이 달라짐을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 110°C 에서 130°C 사이 온도영역에서 이러한 시간에 따른 응답특성 변화가 크게 나타나는데, 이는 응력완화계수 측정을 위한 응력완화시험에서와 유사한 특성을 보이고 있다. 응력완화계수와 마찬가지로, 시간 및 온도에 따라 크리프 컴플라이언스 응답 특성은 시간-온도호환기법을 통하여 다음 식으로 표현가능하다.

$$J(t, T_0) = J(\alpha_T t, T) \tag{5}$$

여기서, J 는 크리프 컴플라이언스를 의미한다. 이러한 시간 및 온도에 대한 크리프 컴플라이언스 또한 앞서 언급된 WLF 식을 이용하여 근사적으로 예측가능하다. Fig. 6에 나타난 각 온도별로 측정된 크리프 컴플라이언스를 시간-온도 호환기법을 적용하여 재료의 기준선도를 도출하면 Fig. 7과 같이 도출 가능하다.

기준온도에 대한 온도별로 측정된 크리프 컴플라이언스 값에 대한 시간호환상수, WLF식을 통한 곡선접합된 시간호환상수 및 유리전이온도를 기준으로 시간호환 상수의 기울기변화 천이에 대하여 WLF 식을 각각 적용하여 곡선접합된 형태의 시간호환상수를 Fig. 8에 나타내었다. 지정된 온도영역에서 수행된 크리프 시험으로부터 도출된 시간호환 상수에 대한 곡선접합을 통해 산출된 WLF 식의 재질상수는 Table 2에 정리하였다.

2.2 열팽창계수

유리섬유강화 복합재의 온도에 따른 열팽창계수는 IPC-TM 650 규격에 따라 측정되었다. 측정장비는 Material Analysis & Characterization 사의 TMA 4000SA 모델이 사용되었다. 유리섬유강화 복합재의 직교이방성(Orthotropy)을 고려하기 위하여, 시험에 사용된 유리섬유강화 복합재의 평면폭(Vertical Direction), 길이(Horizontal Direction) 및 두께 방향(Thickness Direction)으로 시편을 취출하여 열팽창계수를 측정하였다. 먼저 기본하중을 인가한 상태에서 사전정의된 온도영역에서의 열변형량을 측정하고, 이를 통하여 열팽창계수를 계산하는 순으로 측정하였다. 사용된 유리섬유강화 복합재는 열경화성 수지가 적용되었으며, 두께가 $100\mu\text{m}$ 이고, 교축방향 단층으로 적층된 프리프레그(Prepreg) 경화 상태의 재료이다. Fig. 9에서 방향별 측정된 열팽창계수를 확인할 수 있다.

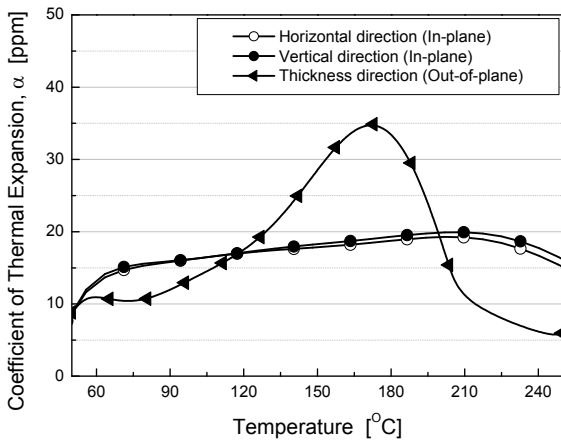


Fig. 9 Coefficients of thermal expansion of the given glass fiber reinforced epoxy composite

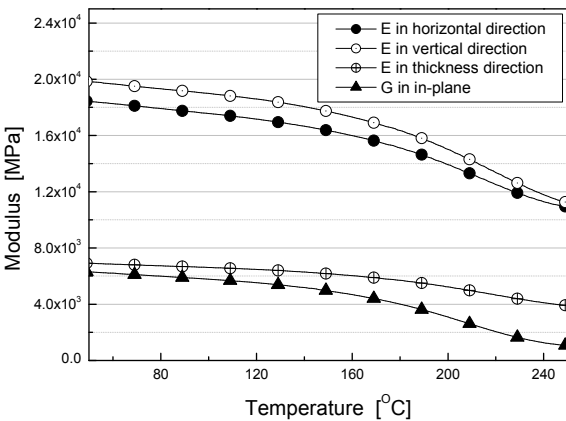


Fig. 10 Elastic moduli of the given glass fiber reinforced epoxy composite

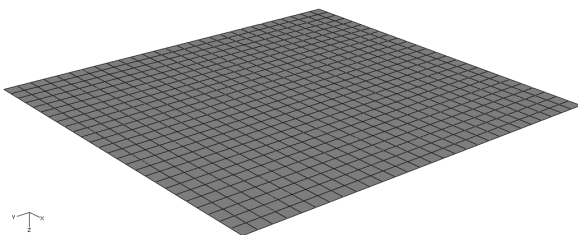


Fig. 11 Configuration of finite element model for printed circuit board

2.3 탄성계수

유리섬유강화 복합재의 온도에 따른 탄성계수도 열팽창계수와 동일하게 IPC-TM 650 규격에 따라 측정되었다. 측정장비는 TA Instrument 사의 DMA Q800 모델이 사용되었다. 유리섬유강화 복합재의 직교이방성을 고려하기 위하여 시험에 사용된 유리섬유강화 복합재의 평면 폭, 길이 및

Table 3 Lay-up information of printed circuit board

Material of Each Layer	Thickness [%]	Cu or SR Open-rate[%]
Top SR	6.8	10.8
Cu	6.2	43.4
PPG	13.7	-
Cu	6.2	39.8
PPG	34.2	-
Cu	6.2	53.0
PPG	13.7	-
Cu	6.2	47.9
Bottom SR	6.8	23.4

두께 방향으로 종탄성계수를 측정하였고, 평면내 횡탄성계수는 평면 폭 방향에서 45° 경사진 방향으로 시편을 취출하여 시험한 후 응력-변형률 관계를 토대로 환산되었다. 이렇게 측정된 탄성계수는 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소모델 구축 및 해석조건

앞선 2절에서 평가된 유리섬유강화 복합재 기계적 물성에 대한 온도환경 하에서 구조변형으로의 영향을 파악하기 위하여, 인쇄회로기판의 열변형 예측을 위한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Standard를 이용하여 수행되었다. 인쇄회로기판을 제작하는 공정 중 칩 실장 이전 기판 예비가열(Pre-baking) 공정에서 가해지는 온도변화에 대한 열변형 예측을 위하여, 두 가지 해석조건으로 해석을 수행하였다. 먼저, 인쇄회로기판을 구성하는 모든 재료가 점탄성 특성이 없다는 가정 하에서 열변형을 예측하였다. 그리고, 동일한 유한요소모델 및 경계조건하에서 회로층 사이의 유리섬유강화 복합재료의 점탄성 특성을 고려하여 열변형을 다시 한번 예측하였다. 이 때, 유리섬유강화 복합재의 점탄성 특성은 응력완화 시험 및 크리프 시험을 통하여 각각 정의하고 점탄성 해석에 고려하여 차이를 검토하였다.

칩 실장 이전의 예비가열 공정에서 가해지는 온도환경 하에서의 열변형 해석을 위한 유한요소모델은 Fig. 11에서 확인할 수 있다. 열변형 평가를 위해 고려된 인쇄회로기판은 Cu, SR film 및 유리섬유강화 복합재층으로 구성되어지며 층별 료 및 두께 등의 정보

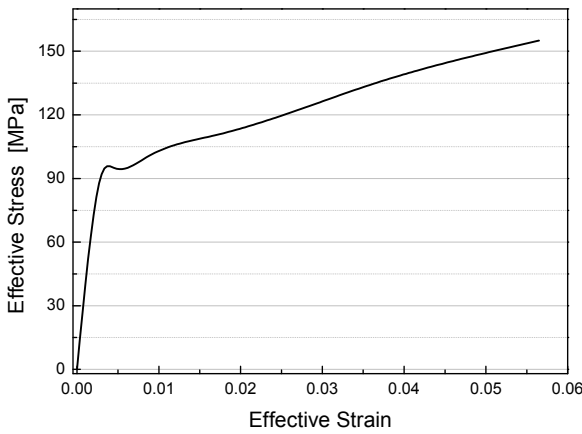


Fig. 12 Stress-strain relationship of Cu

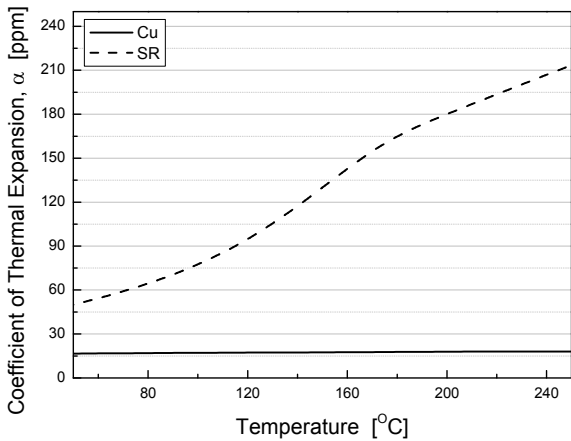


Fig. 13 Coefficients of thermal expansion of Cu & SR

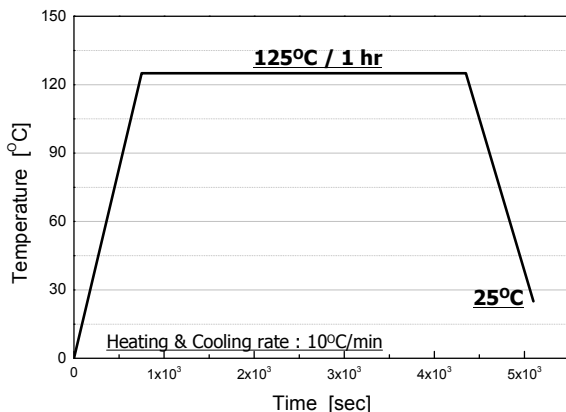


Fig. 14 Temperature profile in packaging processes for FC package

재는 Table 3에서 확인할 수 있다. 인쇄회로기판의 전체 두께는 대략 300um 수준이며, Cu층은 회로구성을 위하여 Table 3에 나와 있듯이 층별 잔존율을

가지고 있다. 기판 상하층에는 회로보호를 위하여 SR층이 도포되어 있으며, Cu층의 회로형상에 따라 적절히 제거된 영역을 보유하고 있다. 유한요소모델 과정에서 Continuum Shell 요소의 층간 적층 기능을 활용하여 각각의 층에 대한 물성 정보를 할당하였다. 해석결과에서 나타나는 인쇄회로기판의 두께방향으로의 열변형을 정량적으로 평가하기 위하여, 구축된 유한요소모델의 중앙부위 절점에 대하여 대칭 경계조건을 부여하여 해석을 수행하였다. 실제 기판의 온도변화 환경하에서의 변형형태는 기판의 형상 대칭조건으로 인하여 중앙부위를 기반으로 변형이 발생하기 때문에 이러한 경계조건을 할당하였다.

유한요소해석이 적용된 인쇄회로기판의 구성재료 중 유리섬유강화 복합재의 경우는 2절에서 평가된 물성을 적용하고 나머지 재료인 Cu와 SR 재료에 대해서는 추가시험을 통해 얻어진 Fig. 12 및 13과 같은 물성치를 적용하였다. 아울러, SR 재료의 경우, 등방성 재료로 가정하여 상온에서 측정된 결과값인 3.4GPa을 탄성계수로 할당하였다. 칩이 실장되기 전 예비가열 공정 상에서 가해지는 온도변화는 Fig. 14와 같이 정의하여 해석에 적용하였다. 점탄성 특성을 고려하지 않은 해석에도 동일한 온도경계조건을 부과하여, 점탄성 특성을 고려한 해석결과와 비교 검토를 실시하였다.

3.2 해석결과 검토

인쇄회로기판을 구성하는 유리섬유강화 복합재 물성의 탄성 및 점탄성 정의에 따른 예비가열 공정에서의 변형량은 Fig. 15 및 16에 나타내었다. Fig. 15의 온도에 따른 기판 최대 변형량 비교에 나타난 것처럼, 점탄성 물성을 할당한 모델에서는 변형량이 예비가열 공정에서의 온도 하중이 가해지는 시간에 따라 변화함을 알 수 있다. 예비가열 공정의 최대 온도 영역(125°C)에서 발생하는 변형량도 시간에 따라 다소 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 16에 비교된 예비가열 공정의 최종 온도(25°C)에서 발생된 인쇄회로기판의 전체 변형 형태를 살펴보면, 전체 기판에서 발생하는 변형량의 차이가 상당히 발생하는 것을 확인 가능하다. 이때의 최대 변형량을 Table 4에 정리하였으며, 점탄성 물성을 고려하였을 때의 해석결과가 유리섬유강화 복합재를 탄성 재료로 가정한 것보다 대략 60%에서 70%가량 더 큰 열변형을 예측하였다. 아울러, 점탄성물성 평가를 위한 크리프 시험 및 응력완화 시험에 대한 해석

Table 4 Comparison of thermal warpages in the numerical analyses

Assignment of Material Property	Final Warpage [μm]	Discrepancy [%]
Elastic Property	4.58	-
Viscoelastic Property with Creep Test	7.86	71.6
Viscoelastic Property with Stress Relaxation Test	7.35	60.5

3. 결 론

본 논문에서는 인쇄회로기판에 사용되는 주요 고분자 재료인 유리섬유강화 복합재에 대한 단축 인장 모드의 응력완화 시험과 크리프 시험을 통하여 점탄성 특성을 규명하였다. 아울러, 고분자 재료의 점탄성 물성의 영향성을 파악하기 위하여, 유한요소해석을 이용한 인쇄회로기판의 예비 가열 공정상에서 가해지는 온도변화에 따른 열변형을 평가하였다.

이러한 연구과정을 통하여, 고분자 재료가 사용되는 인쇄회로기판과 같은 전자회로 구조물의 고분자 재료 점탄성 물성을 고려하여야만, 유한요소해석기법을 적용하여 보다 명확한 변형거동을 예측가능 함을 알 수 있었다. 또한, 유한요소해석을 통한 가해지는 온도에 따른 열변형 예측 결과, 고분자 재료의 점탄성 거동은 응력완화 시험 혹은 크리프 시험으로 평가된 물성의 해석결과에서 다소 차이를 나타내지만, 전체 변형량에 대하여서는 무시할 만한 수준임을 알 수 있었다.

본 논문에서의 연구를 바탕으로, 고분자재료를 사용하는 전자회로 구조물의 열변형 예측시 점탄성 물성의 고려 필요성을 검증하였으며, 이러한 고분자재료의 점탄성 물성 평가가 요구되는 온도 하중에 대한 구조설계시 도움이 되리라 판단되어진다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 주저자는 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, K. Y. and Yang, J. H., 1998, "Cracking Analysis of Plastic IC Package in Consideration of Viscoelasticity," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 22, No. 3, pp. 671~679.
- (2) Lee, K. Y. and Yang, J. H., 1998, "Viscoelastic Cracking Analysis of Plastic IC Package with Polyimide Coating Layer," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 22, No. 10, pp. 1930~1937.

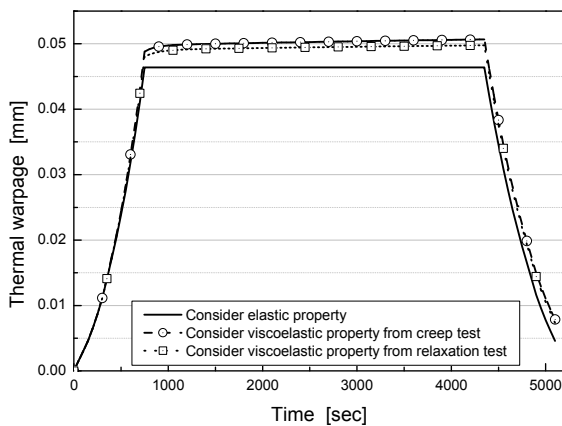


Fig. 15 Thermal warpages in the numerical analyses with respect to assignment of material property

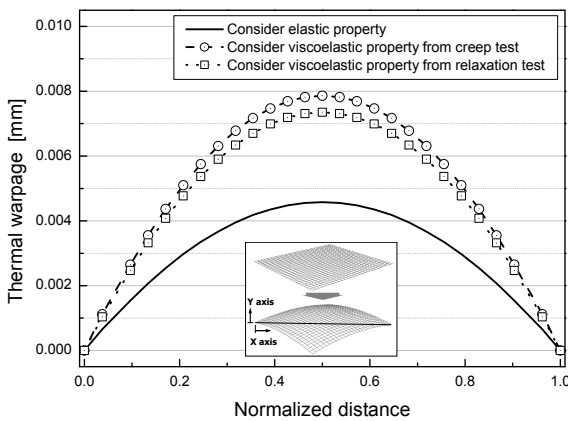


Fig. 16 Thermal warpages at final temperature (25°C) with respect to assignment of material property

결과 예측된 열변형량 결과는 거의 동일한 수준이라고 언급가능하다. 이러한 결과를 바탕으로 점탄성 재료가 일부 적용된 인쇄회로기판과 같은 구조물의 온도환경 하에서의 유한요소해석에서는 점탄성 물성을 반드시 고려하여야만 보다 더 명확한 변형형을 예측가능하다고 판단할 수 있다.

- (3) Oh, K. W. and J, J. W., 2004, "Submicro-displacement Measuring System with Moire Interferometer and Application to the Thermal Deformation of PBGA Package," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 28, No. 11, pp. 1646~1655.
- (4) Choi, N. J. and Joo, J. W., 2009, "The Effect of Finite Element Models in Thermal Analysis of Electronic Packages," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 4, pp. 380~387.
- (5) Zhu, Q., Shrotriya, P., Sottos, N. R. and Geubelle, P. H., 2003, "Three-dimensional Viscoelastic Simulation of Woven Composite Substrates for Multilayer Circuit Boards," *Composites Science & Technology*, Vol. 63, pp. 1971~1983.
- (6) Oliveira, B. F. and Creus, G. J., 2004, "An Analytical-numerical Framework for the Study of Ageing in Fibre Reinforced Polymer Composites," *Composite Structures*, Vol. 65, pp. 443~457.
- (7) Fisher, F. T. and Brinson, L. C., 2001, "Viscoelastic Interphases in Polymer-matrix Composites: Theoretical Models and Finite-element Analysis," *Composites Science & Technology*, Vol. 61, pp. 731~748.
- (8) Yeung, T. S. and Yuen, M. M. F., 1996, "Viscoelastic Analysis of IC Packaging Warpage," *ASME Sensing, Modeling & Simulation in Emerging Electronic Packaging*, Vol. 17, pp. 101~107.
- (9) Van Driel, W. D., Janssen, J. H. J., Zhang, G. Q., Yang, D. G. and Ernst, L. J., 2003, "Packaging Induced Die Stresses-Effect of Chip Anisotropy and Time-Dependent Behavior of a Molding Compound," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 125, pp. 520~526.
- (10) He, Y., 2005, "Thermomechanical and Viscoelastic Behavior of a No-flow Underfill Material for Flip-chip Applications," *Thermochimica Acta*, Vol. 439, pp. 127~134.
- (11) Williams, M.L., Landel R. F. and Ferry J. D., 1955, "The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 77, pp. 3701~3707.