Journal of the Microelectronics & Packaging Society
Vol. 18, No. 2, p. 11-15. 2011

이종 소재 접합체의 흡습 질량 확산 해석

김용연†
충북대학교 기계공학부

A Study of Hygroscopic Moisture Diffusion Analysis in Multimaterial System

Yongyun Kim†
School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, 52 Nasudongro, Cheongju-si, Chungbuk 361-763, Korea

(2011년 4월 26일 접수: 2011년 6월 7일 게재 확정)

초 록: 폴리머의 흡습문제를 해석하기 위해 흡습확산 지배방정식과 열전달 방정식을 고찰하였다. 두 방정식의 동일한 형식의 편미분방정식이기 때문에 상사의 법칙을 적용하여 물체가 등온 하중조건을 받고 있을 때 단일 매질의 확산문제를 상용유한요소코드에 의해 수치적으로 해석 하였다. 여러 소재로 구성된 매체는 흡습질량이 접착면에서 불연속 특성을 갖기 때문에 확산해석에 상사법칙을 직접적으로 적용할 수 없으나 흡습관련 소재 특성이 온도만의 함수인 소재로 구성된 매체에서 흡습확산 문제는 접착면에서 연속성을 가지고 있는 압력비를 고려함으로써 해석하였다. 실리콘-비전도성 수지 접합체의 측정된 흡습 변화량은 접합면을 경계조건으로 하고 단일 매체에 대한 해석 결과와 매우 근접한 결과를 보였으나, 복합체로 해석한 결과는 흡습시간이 경과할수록 점점 큰 오차가 발생하였다.

Abstract: Heat transfer equation is first reviewed and then governing equation of moisture diffusion. Analogy scheme is applied to analysis the moisture absorption problem of polymers. It make possible to numerically analyze the diffusion problem for single medium by using commercial finite element code if it is under the isothermal loading condition. It is extended to special multimaterial system by introducing pressure ratio function, whose moisture characteristics of materials are proportional to temperature only. The weight changes of silicon-nonconductive-polymer joint model due to moisture absorption is measured and been very close to the numerical results as for single media with boundary condition with zero concentration, but yields numerical errors as for multisystem media.

Keywords: moisture diffusion, solubility, diffusivity, polymer, finite element analysis

1. 서 론

증기가 폴리머 소재에 흡수되면 물 분자는 수소분자의 결합 길이를 확장시켜 소재를 팽창하게 함으로써 플라스틱 전자 패키지에서 팝콘 이나 이종 소재의 분리와 같은 파손을 일으키는 원인이 되는 것으로 알려져 있다.[1)] 전자 패키지는 몰드 폴리머, 리드프레임, 그리고 실리콘칩, 등으로 구성되어 있고, 각 소재의 흡습팽창계수의 불일치로 인하여 팽창량이 동일하지 않기 때문에 이종 소재 접합층에서 연속조건을 만족시키기 위한 응력이 발생된다. 플라스틱 전자 패키지에서 온도 변화에 의한 열변형보다 수분에 의한 흡습변형이 더 큰 경우도 최근 연구에서 발표되었다.[2)] 고분자 박막 경계면 박리 파손을 고찰하기 위해 수분 흡수에 의한 점탄성 응력을 해석하였고[3)], 표면실장 전자패키지가 이송 도중 수분 흡수를 방지하기 위한 흡습방지 포장재를 개발하기 위한 연구가 있었지만[4)], 시간이 경과에 대한 흡습량 변화에 대한 연구는 많지 않았다. 또한 자동차 또는 통신 환경에 적용되는 패키지는 극심한 온도 변화 또는 습도 변화를 받게 되기 때문에 열팽창계수의 불일치에 의한 열응력 뿐 아니라 수분팽창계수의 불일치에 의한 흡습 응력에 대한 분석이 요구되고 있다. 흡습응력 해석을 위해 상용 유한요소 코드를 활용하고자 하였지만[5-6)], 대부분의 코드는 질량확산해석 기능을 제공하지 않기 때문에 열전달해석 기능으로부터 열전달 방정식과 수분 확산 방정식의 상사성 고찰하지 않으면 흡습확산 문제를 상용코드를 이용한 수치적 해석은 큰 오차를 피하기 어렵다. 용해도가 유한 값을 갖는 이종소재의 흡습 해석은 많은 부분 연구 되었으나[8-10)], 용해도가 영인 실리콘 또는 금속과 유한 값의 용해도를 갖는 폴리머-실리콘 접합체의 흡습해석에서 발생되는 수치적 오차에 대한 연구는 많지 않다.

본 논문에서는 열전달 방정식과 흡습확산 방정식에 대한 상사성과 접합면의 흡습질량의 불연속특성을 고려한 확산 방정식을 고찰하고, Ansys 유한 요소 해석 코드의

†Corresponding author
E-mail: yykim@cbnu.ac.kr

열확산 해석 절차를 적용하여 실리콘-비전도성 폴리머 접합체의 흡습변화를 해석하고 실험적으로 측정하였다. 반도체 패키지는 금속, 실리콘, 폴리머, 등으로 구성된 패키지 흡습 해석에도 수치적 오류를 수반하게 된다. 따라서 비흡습 접합면을 경계조건으로 처리한 단순 해석결과와 압력비 해석 결과가 동일함을 고찰하고, 접합체로 해석한 수치 해석 결과의 차이점을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 열전달방정식

등방성 균일 매체에 대한 열전도 방정식은 Fourier 법칙과 에너지 보존 법칙에 따라서, 내부 열원을 무시할 경우,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}, (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

로 표현된다. 식 (1)에서 T는 절대온도[K]이고, α는 열확산 계수[m^2s^{-1}]로 $\alpha = k/\rho C_p$이고, k, ρ, C_p는 각각 열전도계수[$Wm^{-1}K^{-1}$], 밀도[kgm^{-3}], 그리고 비열[$Jkg^{-1}K^{-1}$]이다.

2.2. 질량확산 방정식

등방성 균일 매체에 대해 매체 내부 질량 발생원이 없을 경우, 질량확산방정식은 Fick 법칙과 질량 보존 법칙에 따라서,

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{1}{D}\frac{\partial C}{\partial t}, (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

로 표현된다.[7] 식(2)에서 C는 단위부피당 흡습질량[kgm^{-3}]이고, D는 질량확산 계수[m^2s^{-1}]로 일반적으로 온도와 흡습질량의 함수이다. 등방성 균일 매체에서 식 (1)의 열확산계수 α는 소재 상수이지만, 식 (2)에서 질량확산계수 D는 일반적으로 온도와 흡습질량의 함수이기 때문에 식 (1)과 식 (2)의 상사적 특성을 적용하여 식 (1)의 해를 구하는 절차에 D 따라 식 (2)의 해를 구하기 위해서는 질량확산 계수 D에 대한 고찰이 필요하다. 질량확산 문제에서 매체 온도 변화가 없을 경우 질량확산계수는 상수가 된다. 즉 등방성 균일 매체에서 온도가 일정하게 유지되는 조건이라면 식 (1)과 식 (2)는 동일한 형식의 편미분 방정식이기 때문에 식 (1)의 열전달 방정식에 직접적으로 열확산 계수(α)에 질량확산계수 D를 대입함으로서 열전달 방정식의 해를 구하는 방법으로부터 매체의 흡습질량(C)를 계산할 수 있다.[8]

2.3. 이종소재 접합체의 흡습질량 불연속 특성

식 (1)의 열전달 방정식의 해인 온도(T) 분포는 단일 매질이 T거나 이종 매질에서도 연속조건을 만족하는 반면, Fig. 1과 같은 이종 소재 매체는 대기중의 수분을 흡수할 때 흡습질량(C) 분포는 연속조건을 만족하지 않는다. 식 (2)의 해인 흡습질량은 단일 매질에서는 연속 조건을 만족하기 때문에 C 열전달 방정식으로부터 흡습질량을 계산할 수 있으나, 이종 소재로 구성된 이종소재접합 매체는 일정한 온도의 경우에도 이종소재 접합면에서 흡습 질량은 불연속 특성을 갖기 때문에 이종 매질에서 흡습질량 분포는 열전달 방정식으로부터 직접 계산하면 접합면 주위에서 계산오류가 발생한다.[8]

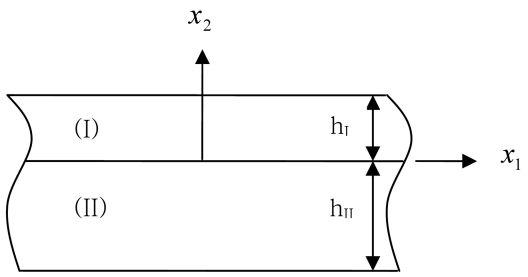

Fig. 1. Double layered model.

Fig. 1과 같이 서로 다른 소재 (I)과 (II)로 구성된 무한판이 $x_2 = h_I$와 $x_2 = -h_{II}$에서 증기압 P_{vp}를 받고 포화상태일 때 소재 (I)과 소재 (II)에서 포화 흡습량이 각각 $C_{sat}^{(I)}$ 과 $C_{sat}^{(II)}$ 로 표현할 때, 이종소재 접합면($x_2 = 0$)에서 포화 흡습질량은 불연속 $C_{sat}^{(I)} \neq C_{sat}^{(II)}$ 이다. 임의의 온도에서 증기압(P_{vp})이 폴리머 주위에 작용하면 폴리머는 대기중의 수분을 흡수하고 충분한 시간이 경과되면 소재 전 영역에서 포화상태가 된다. Henry의 법칙에 따라 포화 흡습질량(C_{sat})은 주위 증기압(P_{vp})에 비례한다. 즉,

$$C_{sat} = SP_{vp}(T) \quad (3)$$

그러나 비례계수(S)는 C_{sat}의 함수이기 때문에 일반적으로 비선형 함수이지만, 반도체 패키지에 적용되는 거의 모든 재료의 비례계수는 온도(T)만의 함수이므로, 식(3)은

$$C_{sat}(T) = S(T)P_{vp}(T) \quad (4)$$

로 표현될 수 있다. 식(4)으로부터 폴리머는 충분한 시간 경과 후 포화상태의 방정식으로 포화 흡습질량은 임의의 온도에서 증기압에 비례함을 알 수 있다. 그러나 포화상태에 이르기 전 임의의 시간(t)에서 폴리머는 증기압을 받는 경계면에 근접한 영역은 포화상태에 이를 수 있지만 내부 영역은 포화상태에 이르지 않았을 것이다. 포화상태이전의 흡습질량을 경과 시간(t)와 폴리머내의 임의 위치(x_i)에 종속되는 함수로 정의하기 위해서 식(4)에서 포화흡습질량$C_{sat}(T)$대신에 흡습질량$C(T,x_i,t)$를 대입하고, 위치와 시간에 대해 상수인 증기압 대신에 임의의 함수 $\phi(x_i,t)$를 도입하면, 임의의 시간과 임의의 위치에서 흡습질량은

$$C(T, x_i, t) = S(T)P_{sat}(T)\phi(x_i, t) \quad (5)$$

로 표현될 수 있다. 여기서 $S(T)$는 용해도(solubility)는 폴리머의 특성 계수이기 때문에 Fig. 1과 같은 이종 연속체에서 용해도는 이종 접합면($x_2 = 0$)에서 불연속 함수이지

만, 함수$\phi = P/P_{sat}(T)$를 압력비로 정의하고, 시간과 위치 함수로 소재특성과 무관하기 때문에 이종 접합면에서도 연속조건을 만족한 것으로 가정할 수 있다. 따라서 식(5)을 식(2)에 대입하여 수식을 전개하면 식(2)는

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{1}{DS}\frac{\partial \phi}{\partial t}, (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

된다. 여기서 매질의 온도가 일정하면 확산계수와 용해계수는 상수가 되기 때문에 상사의 법칙에 따라 식(1)의 해석 절차를 적용하여 흡습질량의 분포를 계산할 수 있다. 식(1)과 식(6)을 비교하면 식 (6)은 식 (1)과 같은 형식의 편미분 방정식이기 때문에 식 (1)에 $\alpha = DT$, $T = \phi$를 대입한 결과식이다. 따라서 상용코드의 열전달 방정식 해석 기능을 활용하여 매체 내부의 압력비 ϕ의 분포를 계산할 수 있고, 계산된 압력비를 식(5)에 대입하여 흡습질량을 계산할 수 있다.

3. 실험과 수치해석

3.1. 흡습질량 측정

흡습질량 측정과 해석에 사용된 소재 시편은 Fig. 2에 표현된 구조를 가지고 있고 반도체 회로 소재인 실리콘과 패키지 소재인 비전도성 폴리머(nonconductive polymer)의 이종소재 구성되어 있다. 시편의 크기는 Table 1과 같다. 흡습질량을 측정하기 위해 먼저 대기 중에 보관된 시편은 수분을 가지고 있기 때문에 120ºC, 0%RH(상대습도)로 72시간 동안 흡습챔버(ESPEC SH-241)에 두어 수분을 제거하였다. 초기 질량을 측정한 후 흡습챔버에 넣어서 증기를 시편이 흡수하도록 하였다. 흡습챔버를 55ºC, 85%RH로 유지시키고, 시편을 일정시간 흡습시킨 후 흡습질량을 측정하였다. 측정에 사용된 마이크로 바란스(Denver Instrument PI-225D)는 샘플의 부력에 의한 오차를 발생시킬 수 있을 정도로 정밀한 계측기이기 때문에 챔버에서 꺼낸 후 열전달이 잘 되는 물체에 접촉하여 가능한 신속히 상온에 이를 수 있도록 3-4분 정도 열을 방출시킨 후 3~4회 측정하여 평균값을 취하였다.

3.2. 유한요소 해석

식(1)은 열전달 문제로 온도장의 지배 방정식이고, 식

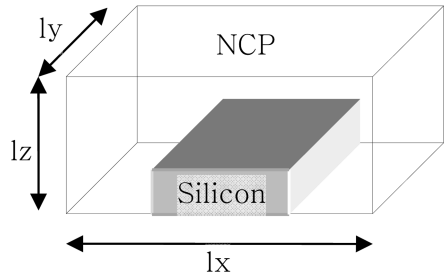

Fig. 2. Geometry of NCP/Silicon joint.

Table 1. Dimension of NCP-silicon joint

	NCP	Silicon
Length(lx)(mm)	10.0	2.5
Height(lz)(mm)	3.1	0.7
Thickness(ly)(mm)	4.0	4.0

(2)는 흡습확산 장의 지배 방정식이고, 식 (6)은 흡습압력비 장의 지배 방정식이다. 식 (1), 식 (2)과 식 (6)은 편미분 방정식으로 상사적 특성을 가지고 있기 때문에 동일한 절차를 적용하여 해를 구할 수 있다. 식 (1)의 열전달 해석 방법과 동일한 해석 절차를 적용하여 식 (2) 과 식 (3)으로부터 물체 내부의 흡습질량과 압력비(ϕ)를 각각 계산하였다. 이종접합체의 흡습질량에 대한 지배방정식은 식 (6)을 적용해야 하지만, 실리콘-폴리머 접합 시편의 경우 실리콘은 흡습하지 않는 특성으로 인하여 실리콘 접합면을 폴리머의 경계조건으로 대체하여 식 (2)를 적용할 수 있다. 식 (6)의 해를 수치적으로 확인하기 위해 동일 실험 시편에 대해 3가지 방법으로 해석하고 그 결과를 분석하여 이론적 고찰을 확인하였다. 수치 해석에 적용된 소재의 흡습 특성은 Table 2와 같다. 여기서 실리콘의 용해도와 확산 계수는 실질적으로 영이지만, 소재 특성으로 영을 입력할 경우 지배방정식은 성립하지 않는다. 따라서 Table 2에 제시된 실리콘의 소재상수는 수치 해석이 가능한 최소값이다.

첫 번째 경우(Case 1)는 실리콘에서 질량확산계수 D와 용해계수 S는 영이기 때문에 폴리머와 실리콘의 접합면으로부터 흡습은 일어나지 않는다. 따라서 식 (2)로부터 흡습질량 분포를 계산하기 위해 Fig. 2와 같은 경계조건을 적용하였다. 온도 To = 55ºC 이고, Fig. 2에서 점선으로 표현된 실리콘과 폴리머(NCP)의 접합면의 증기질량은(흡습질량), Cs =0 g/mm^3 이고, 실선으로 표현된 증기와 폴리머의 경계면은 85%RH로부터 흡습된 질량, Cp = 8.79×10^{-6} g/mm^3 이다.

두 번째 경우(Case 2)는 식 (6)을 적용하여 단일 매체

Table 2. Material properties of NCP and silicon

	NCP	Silicon
Diffusivity D [mm^2 s^{-1}]	4.05E-7	6.55E-14
Solubility S [g mm^{-1} N^{-1}]	6.16E-4	2.53E-11
Density ρ [g mm^{-3}]	1.18E-3	2.33E-3

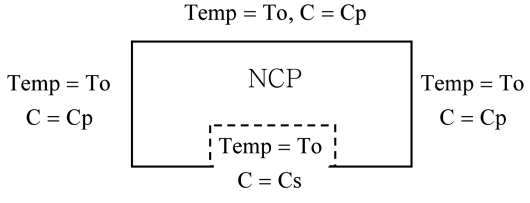

Fig. 2. Boundary condition for moisture concentration analysis of single media.

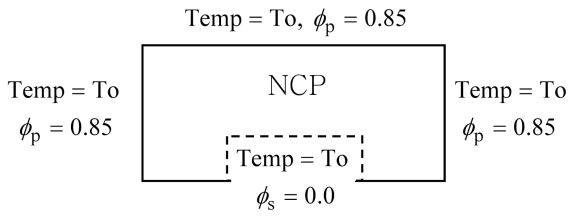

Fig. 3. Boundary condition for pressure ratio analysis of single media.

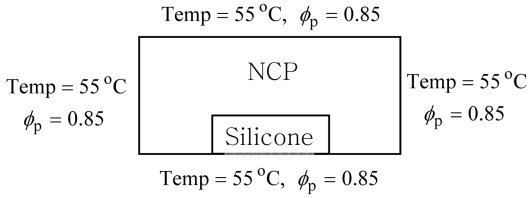

Fig. 4. Boundary condition for pressure ratio analysis of silicone-polymer media.

폴리머에 대해 흡습질량을 계산하였다. 첫 번째의 경우의 경계조건인 흡습질량 대신 압력비(ϕ)가 경계조건이 된다. Fig. 3은 식 (6)으로부터 압력비를 구하기 위한 경계조건을 보여준다. 온도, To = 55°C 이고, Fig. 3에서 점선으로 표현된 실리콘과 폴리머의 접합면의 압력비 $\phi_s = 0$을 적용하였고, 실선으로 표현된 공기와 폴리머의 경계면은 압력비는 $\phi_p = P_{vp}/P_{sat} = 0.85$이다.

세 번째의 경우(Case 3)는 식 (6)으로부터 폴리머-실리콘 접합체의 흡습질량을 계산하였다. Fig. 4는 식 (6)으로부터 실리콘-폴리머 접합체의 압력비의 분포를 구하기 위한 경계조건을 보여준다. 경계면에서 압력비는 $\phi_p = 0.85$이다.

3.3. 해석 결과 및 고찰

Fig. 2에서 보여준 접합체의 대칭성을 적용하여 Fig. 5와 같이 접합체의 1/4에 대해 유한요소 망를 생성시켰다. Case 1의 경우 직접적으로 계산된 단위부피당 흡습질량을 유한요소 부피와 곱하여 합산하였다.

Case 2와 3의 경우, 시편과 분위기 온도가 55°C일 때 증기압 $P_{sat} = 1.68\times10^{-2}$ *MPa*이고, 식 (5)의 $SP_{sat} = 1.03\times10^{-5}$ *g/mm*^{3}으로 일정하다. Fig. 6은 압력비를 고찰하기 위한 경로를 보여준 그림으로 경로 A는 $0 \le x \le lx$, $y = ly$, $z = lz/10$ 이고, 경로 B는 $x = lz/8$, $y = ly/4$, $0 \le x \le lz$ 이다. Fig. 7과 Fig. 8은 Case 2와 Case 3으로부터 흡습 시간 경과 대비 압력비 변화에 대한 수치해석 결과를 보여준다. 8/32/128 시간 동안 흡습할 때 경로 A와 경로 B위치에서 계산된 압력비는 경계면에 근접한 영역에서 Case 2와 3는 거의 일치하고 있지만, 이종 접착면을 경계조건으로 처리한 경우(case 2)와 이종 소재 접착면으로 해석한 결과(case 3)는 차이가 있음을 Fig. 7과 8로부터 관찰할 수 있다. 실리콘은 흡습을 하지 않지만 수치 해석이 가능한 범위에서

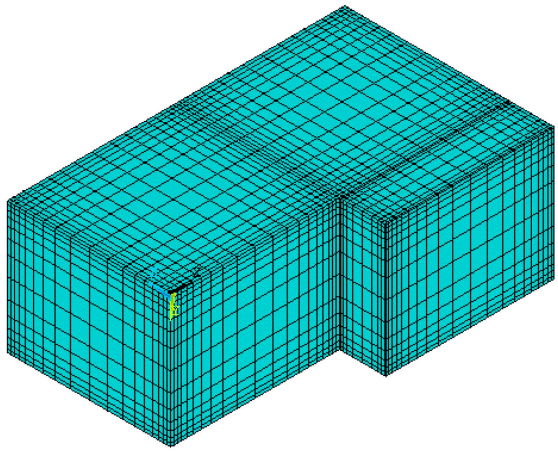

Fig. 5. Mesh generation for case 1 and case 2.

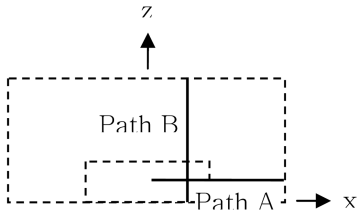

Fig. 6. Line path A and B on the cross section $y = ly/4$.

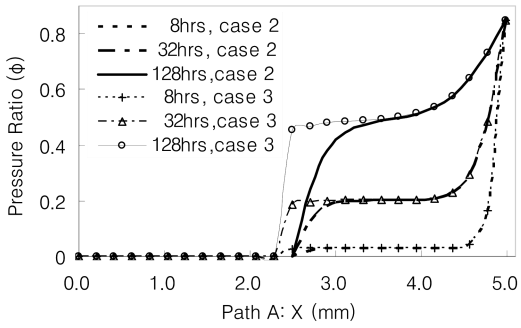

Fig. 7. Distribution of pressure ratio along path A.

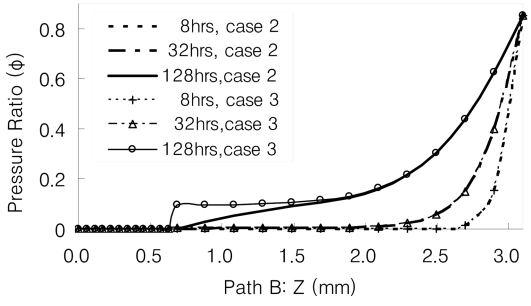

Fig. 8. Distribution of pressure ratio along path B.

용해도와 확산계수를 영에 근접한 값을 적용하였기 때문에 Case 3의 해석에서는 실리콘이 흡습하게 되고 접합면 근접 영역에서 Case 3 흡습량이 Case 2보다 크게 분포됨을 볼 수 있다. 또한 흡습 초기보다는 흡습 시간이 경과

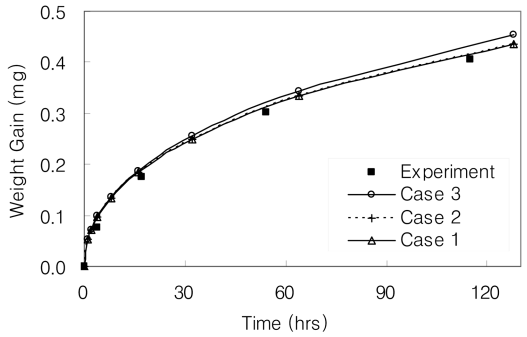

Fig. 9. Total moisture gain versus time.

될수록 오차는 더 커짐을 볼 수 있다. 따라서 실리콘은 수분을 흡수하지 않기 때문에 Case 1 이나 Case 2를 정확한 해석으로 생각할 수 있다. Fig. 9는 흡습량에 대해 측정값과 해석결과 나타낸 그래프이다. 압력비의 해석결과에서 고찰한 것처럼 Case 3의 결과는 Case 1과 Case 2의 결과와 비교하면 흡습 시간이 경과할수록 오차가 증가함을 볼 수 있다. Case 1과 Case 2는 일치하고 있음을 볼 수 있고, 실험값과도 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 측정값이 해석 결과보다 작은 값을 갖는 것은 측정 초기에 시편으로부터 수분을 완전히 제거하였다고 할 수는 없고 수분이 있으면 질량 증가량은 시간이 경과할수록 감소하기 때문으로 생각할 수 있다. 흡습질량은 압력비, 용해계수 그리고 포화 증기압의 곱으로 표현되기 때문에 충분히 무시할 수 있는 오차로 사료된다. 따라서 (측정값 < Case 1 = Case 2 < Case 3)이고, 시간이 경과할수록 오차가 증가하는 것은 충분히 설명될 수 있는 부분이고, 이러한 오차를 고려한다면 식 (6)을 적용하여 실리콘과 같은 용해도와 확산계수가 영인 소재와 유한 값을 갖는 소재로 구성된 복합체의 흡습 확산에 대한 수치 해석이 가능함을 볼 수 있다.

4. 결 론

열전달 방정식과 확산방정시의 상사적 특성을 적용하여 단일 매체에 대해 직접적으로 흡습질량확산을 해석하였고, Henry의 법칙을 적용하고 압력비 변수를 도입함으로써 이종 소재 접합 매체에 대해서도 이론적으로 고찰하였으며 상용유한요소코드를 사용하여 수치적으로 해석하였다. 이론적 고찰을 확인하기 위해 실리콘-비전도성 에폭시 시편을 제작하여 흡습질량의 변화를 측정하고 유한요소법의 열전달 해석절차를 적용하여 흡습질량 변화를 계산하였다. 실리콘은 수분을 흡수하지 않지만 수치 해석이 가능한 범위에서 용해도와 확산계수를 영에 근접한 값을 적용하였기 때문에 해석에 의한 흡습 분포는 접합경계에 근접한 영역에서 실험 값보다 크게 분포되었고, 흡습 초기보다는 흡습 시간이 경과될수록 오차는 더 커짐을 볼 수 있었다. 결과적으로 수치해석결과와 실험결과는 흡습 초기에는 일치하였지만, 시간이 경과 후에 발생되는 약간의 오차를 고려한다면 실리콘과 같은 용해도와 확산계수가 영인 소재와 유한 값을 갖는 소재로 구성된 복합체의 흡습 확산에 대해서도 충분히 활용할 수 있을 것으로 사료되고, 흡습에 의한 응력계산에도 활용될 수 있을 것이다. 그러나 본 해석과정은 일정 온도에서 적용 가능할 뿐 온도 변화 장에서는 추가적 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구 지원 사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. M. Pecht, “Moisture Sensitivity Characterization of Build-up Ball Grid Array Substrates,” IEEE Transactions on Components, Package, and Manufacturing Technology: Part B, 22(3), 515 (1999).
2. E. Stellrecht, B. Han and M. Pecht, “Characterization of hygroscopic swelling behavior of mold compounds and plastic packages,” IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 27(3), 499 (2004).
3. S. Lee and Y. Chang, “Viscoelastic Stress Analysis of Polymeric Thin Layer Under Moisture Absorption(in Korean),” J. Microelectron. Packag. Soc., 10(1), 25 (2003).
4. K. Kim, T. Kim, M. Yoo, and H. Yoo, “Mechanical Tenacity Analysis of Moisture Barrier Bags for Semiconductor Packages,” J. Microelectron. Packag. Soc., 11(1), 43 (2004).
5. J. E. Galloway and B. M. Miles, “Moisture Absorption and Desorption Predictions for Plastic Ball Grid Array Packages,” IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technologies: Part A, 20(3), 274 (1997).
6. H. Wong, R. Rajoo, S. W. Koh and T. B. Lim, “The Mechanics and Impact of Hygroscopic Swelling of Polymeric Materials in Electronic Packaging,” Journal of Electronic Packaging, 124(2), 122 (2002).
7. W. Jost, Diffusion in Solids, Liquids, Gases, 3rd edition, Academic, New York (1960).
8. S. Yoon, B. Han and Z. Wang, “On Moisture Diffusion Modeling using Thermal-Moisture analogy, Journal of Electronic Packaging,” 129, 421 (2007).
9. C. Jang, S. Park, B. Han, and S. Yoon, “Advanced Thermal-Moisture Analogy Scheme for Anisothermal Moisture Diffusion Problem,” Journal of Electronic Packaging,” 130, 011004-1 (2008).
10. S. Yoon, C. Jang, and B. Han, “Nonlinear Stress Modeling Scheme to Analyze Semiconductor Packages Subjected to Combined Thermal and Hygroscopic Loading,” Journal of Electronic Packaging,” 130, 024502-1 (2008).