

고분자 소재에서 흡습 특성의 평가§

박 희 진*†

* 삼성전기 중앙연구소

Evaluation of Moisture Sorption Characteristics in Polymer Material

Hee Jin Park*†

* Corporate R&D Institute, Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.

(Received December 21, 2011 ; Revised August 7, 2012 ; Accepted August 17, 2012)

Key Words : Concentration(확산 농도), Diffusivity(확산성), Permeability(투과성), Reliability(신뢰성), Polymer(고분자), Solubility(용해성), Moisture Sorption(흡습), WVTR(수분 투과율)

초록: 본 논문에서는 PET(Polyethylene Terephthalate)와 같은 박막 형태의 고분자 소재에서 수분 확산을 특성화 하기 위한 표준 과정을 열 중량법을 사용하여 제시하고 소재의 흡습 물성을 정량적으로 얻었다. 온도 및 습도에 대한 흡습 물성들의 영향을 조사하기 위해 아레니우스(Arrhenius) 식에 따른 PET 필름의 용해성과 확산성을 특성화 하였다. Fickian 확산에 기반한 박막 소재의 수분 투과성을 구하여 열중량법에서 얻은 흡습 물성의 타당성을 토론하였다. 고분자 소재가 금속과 같은 무기물과 다층 경계면을 가지는 경우 농도에 의존적인 비선형 수분 확산성의 특성을 실험적으로 조사하였고 Non-Fickian 모델에 따른 비선형 확산 특성을 수치적으로 정량화 하였다. 얻어진 흡습 물성들에 기반한 Fickian/Non-Fickian 모델에 대해 수치적으로 비교 및 토론 하였다.

Abstract: In this paper, the standard procedures for measuring the moisture sorption properties of thin polymeric materials such as polyethylene terephthalate (PET) by using the thermo-gravimetric method to characterize the moisture diffusion in the polymer are presented, and the sorption properties are quantified. The moisture diffusivity and solubility are characterized to investigate the effect of temperature and humidity on the moisture sorption properties according to the Arrhenius equation. The validation of the obtained sorption properties using thermogravimetry is discussed with the measured permeability based on Fickian diffusion. The nonlinear behavior of the concentration dependent moisture diffusion is investigated experimentally, and the nonlinearity is characterized numerically for the case of having an interface with an inorganic material such as a metal. The Fickian/Non-Fickian model based on the obtained moisture sorption properties is compared and discussed.

1. 서 론

플라스틱 패키징에 존재하는 수분은 기계적 열 물성의 변화를 가져와 열 응력을 변화시킨다. 습기에 의한 서로 다른 팽창은 응력을 유발시키고 결국엔 팝콘(popcorn) 크랙 또는 박리와 같은 고장의 원인이 되는 증기압을 야기시킨다. 또한 수분은 전자 소재의 신뢰성에서 유전 물성을 변화시킨

다고 알려져 있다.^(1~4) 특히 고온, 고습의 신뢰성 조건은 터치 스크린 패널(touch screen panel)에서 고분자의 전기적 전도성과 같은 물성의 특성의 변화를 가져온다.⁽⁵⁾ 하지만, 이러한 제품 신뢰성에 중요한 영향을 미치는 온도, 수분에 대한 재료의 영향에 관한 특성화 과정 및 재료의 특성에 관한 연구는 미약한 실정이고 따라서 고분자 소재인 전자 부품에서 흡습 물성들의 측정과 이해는 수분으로 유발된 고장의 신뢰성 모델링에 필수적이다. 고분자 소재에서 물은 일반적으로 구속되지 않고 자유로운 물, 동결할 수 있는 구속된 물, 동결하지 않는 물인 3 가지의 상태로 존재한다고 알려져 있다.⁽⁶⁾ 폴리이더이미드(PEI) 필름을 사용하여 다양한 온도, 습도에서 디클로로메탄(Dichloromethane)

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, hee-jin.park@samsung.com

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

액의 용해는 온도에 따라 고분자의 연결 구조에서 형태적인 변화를 가져올 가능성이 있다고 알려져 있다.⁽⁷⁾ 고분자의 구조적 변화가 일어나지 않는 상태에서 박막 소재의 두께가 재료에 미치는 영향 분석을 위해 수분 수송(transport)에 관한 인자들은 조사되었다.⁽⁸⁾ 높은 확산 농도에서 낮은 확산 농도로 고분자 내에서 매질은 확산되고 투과성은 소재를 통과해서 빠져나가는 수분의 이동을 나타낸다. 이러한 투과성의 메커니즘을 조사하기 위한 방법, 고분자에서의 확산, 투과율의 과도 응답 등으로부터 확산 계수를 정량적으로 구하기 위해 재료의 형상에 따른 수학적 방법 연구되었다.⁽⁹⁾ 이것은 Fickian 모델이 바탕된 열전달과 유사한 질량 확산에 근거하여 대부분 소재의 흡습 거동을 묘사할 수 있지만 확산 농도에 따른 확산성의 차이로 오차는 여전히 남아 있다. Non-Fickian 확산성을 특성화하기 위한 모델링과 챔버, 저울을 이용한 에폭시 합성물(Epoxy Molding Compound)에 대한 수분 흡습에 관한 실험은 수행되었다.⁽¹⁰⁾ 이러한 흡습 실험은 전통적으로 항온, 항습 챔버와 고정도 저울을 사용하여 흡습 물성인 용해성과 확산성을 측정하여 왔다. 이런 방식으로 얻어진 데이터는 측정하는 동안 수분 손실의 양이 무시할 수 있을 때만 타당하다. 측정 동안 수분을 쉽게 흡습하거나 탈습하는 박막의 시료에 대해서는 이러한 점을 막기 위해 유리판을 시료 양쪽으로 덧대어 흡수된 수분의 손실을 최소화하여 소재를 평가한다. 하지만, 이러한 방법은 확산 계수를 얻기 위해 요구되는 과도 응답 반응 데이터에 대해서 측정 시간 간격이 챔버의 개폐에 따른 측정 가능한 환경에 도달하는 시간에 비해 충분히 커야만 한다. 결과적으로, 전통적인 방법을 사용하여 확산성이 매우 큰 박막의 흡습 물성을 측정하기는 매우 어렵다. 이러한 문제점을 대처하기 위해 본 논문에서는 열중량법을 사용하여 온도에 따른 흡습 물성을 정량화 및 과정을 제시하였고 수분 투과성과 비교하여 타당함을 보였다. 또한, 아레니우스(Arrhenius) 식에 따른 특성화를 위해 확산성과 용해성의 온도 의존적인 변수 특성을 얻었고 확산 모델링에 기반한 수치적 계산 값들과 비교하였다.

2. 수분 흡습 특성화

2.1 질량 확산 지배 방정식

Fick의 제 1 법칙 및 질량 보존 법칙으로부터 다음과 같이 확산 지배 방정식인 Fick의 제 2 법

칙을 얻을 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot [D \nabla C] \quad (1)$$

여기서 D 는 확산 계수이고 C 는 확산 농도이다. 고분자 소재 내에 흡수된 수분과 수증기압과의 관계를 정의하는 헨리(Henry)의 법칙과 온도에 따른 특성을 정의하는 아레니우스(Arrhenius) 관계식에 따라 용해성과 확산성은 다음과 같다.

$$C_{sat} = S \times P_{vp},$$

$$S = S_o \exp\left(\frac{E_s}{RT}\right), \quad D = D_o \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서 $C_{sat} (kg/m^3)$ 은 포화된 확산 농도, $R (J/K \cdot mol)$ 은 이상 기체 상수, $T (K)$ 는 온도, $E_s (eV)$ 는 용해 활성화 에너지, $E_D (eV)$ 는 확산 활성화 에너지, $P_{vp} (Pa)$ 는 주변에서의 수증기압, $P_{sat} (Pa)$ 은 포화 수증기압을 각각 나타낸다. 전자 부품 패키징 소재에 대한 용해 활성화 에너지 E_s 의 크기는 $0.44eV$ 에서 $0.46eV$ 영역에 분포하여 있고 이것은 실험에 따르면 포화 수증기압을 아레니우스 식의 형태로 표현했을 때 보이는 활성화 에너지 $E_{vp} (eV)$ 와 같은 크기이므로 $S \times P_{sat}$ 은 온도에 독립적이라고 알려져 있다.⁽²⁾ 따라서, 이러한 소재들에 대해 C_{sat} 은 다음과 같이 상대습도(RH)의 선형적인 함수로 표현되어 질 수 있다.

$$P_{vp}(T, RH)$$

$$= \frac{C_{sat}}{S_o} \exp\left(-\frac{E_s}{RT}\right) = P_o \exp\left(\frac{E_{vp}}{RT}\right) \times RH,$$

$$C_{sat} \approx S_o \times P_o \times RH \quad (3)$$

2.2 수분 확산 물성의 특성화

확산은 단일한 상태 내에서 매질의 불규칙한 분자 운동의 결과로써 매질이 계의 한 부분에서 다른 부분으로 이동되는 과정이다. 일반적으로 확산성을 측정하기 위한 표준 과정에서는 박판을 특정한 온도와 습도의 환경에 노출시켜 시간에 따른 수분 무게 증감을 측정한다. 식 (1)에 대한 수분 함량의 정확 해는 3 차원 육면체 시편의 형상에 대해서 다음과 같이 얻을 수 있다.⁽²⁾

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{L \times M \times N} \exp\left[-\pi^2 t \left(\frac{D_x L}{x_o^2} + \frac{D_y M}{y_o^2} + \frac{D_z N}{z_o^2}\right)\right],$$

$$L = (2l+1)^2, M = (2m+1)^2, N = (2n+1)^2 \quad (4)$$

여기서 M_t (kg) 는 주어진 온도, 습도에서 시간에 따른 시편의 무게, M_{inf} (kg) 는 시편의 무게 변화가 포화된 시점에서의 무게, x_o, y_o, z_o (m) 는 시료의 크기, D_x, D_y, D_z (m^2/s) 는 x, y, z 방향의 확산 계수를 각각 나타낸다. 등방성을 가지는 시편에 대한 확산성을 측정하기 위한 표준 방법은 1 차원 모델링을 바탕으로 ASTM 표준 D5229 에 잘 제시되어 있다.⁽¹²⁾ 수분 확산 평형에 이르기 까지 시편에 흡수된 수분의 양이 측정되면 재료의 수분 확산 계수는 식 (4)의 정확 해를 이용하여 계산된 값과 측정값에서 나오는 에러의 최소화를 통해 구해진다. 용해성은 고분자 재질 내로 투과 매질의 용해 정도를 나타내며 이것은 재료내의 확산 농도를 투과 매질을 구동하는 부분 압력의 비율로 표현된다. 용해성을 정량화 하기 위해 먼저 소재의 포화된 중량 변화는 백분율로 다음과 같이 정의한다.⁽¹²⁾

$$m_{sat,\%} = \frac{(m_{sat} - m_{dry})}{m_{dry}} \times 100 \quad (5)$$

여기서 m_{sat} (kg) 과 m_{dry} (kg) 는 흡습 및 오븐 건조 조건에서 평형에 도달한 시편의 무게를 각각 나타낸다. 상응하는 포화 수분 확산 농도는 다음과 같이 표현되어진다.

$$C_{sat} = m_{sat,\%} \left(\frac{m_p}{V_p}\right) \quad (6)$$

여기서 m_p (kg) 및 V_p (m^3) 는 시편의 질량과 체적을 각각 나타내며 용해성은 식 (2)로부터 결정된다. 확산 특성을 측정하기 위해 온도 및 습도 제어 기능을 가지는 챔버 내에서 실시간으로 무게를 측정할 수 있는 마이크로 저울을 사용하였다. 개략적인 장비는 Fig. 1 에 도식화되어 있으며 온도, 습도를 제어 가능한 챔버와 챔버 내부에 위치하여 시료의 무게 변화를 실시간으로 측정 가능한 마이크로 저울을 도식화 하였다.

시료를 담은 용기는 기준이 되는 용기와 동일한 온도, 습도 환경에서 서로간 상대적인 무게의 차

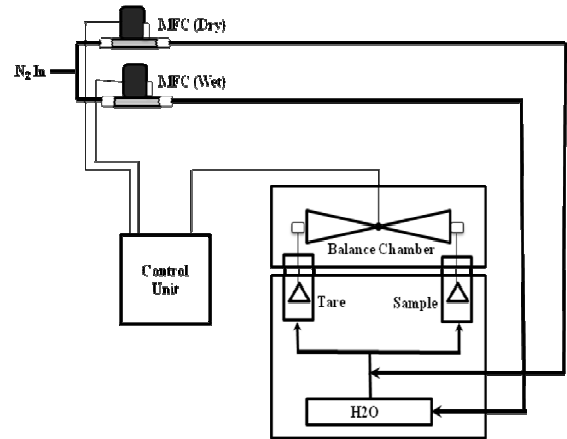


Fig. 1 Schematic diagram of thermo-gravimetric vapor sorption testing instrument

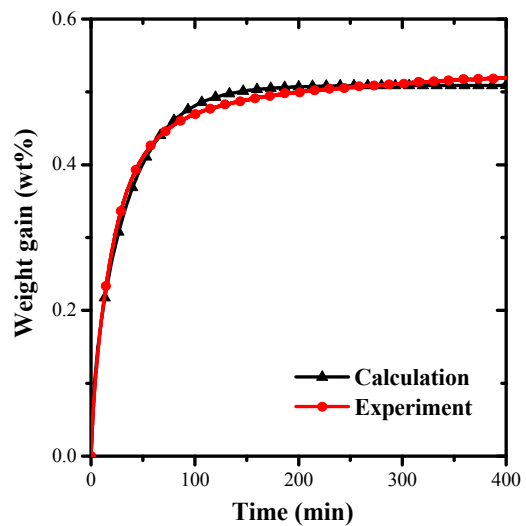


Fig. 2 Weight gain of PET film at 37.5 °C, 98%RH

를 센서가 감지하여 값을 주게 된다. 챔버 내의 상대 습도는 정밀한 질소 유량 제어기(MFC)에 의해 조절되고 저울의 측정 가능 영역은 0.1ug 까지이며 0.1%의 정확도를 가진다. Fig. 2 는 열 중량계를 통해 측정된 무게 값과 식 (4)를 이용한 시료에 흡수된 수분의 계산된 무게 값을 비교하여 보여주고 있다. 온도, 습도에 따라 수분이 고분자 소재 내부로의 확산되어 있는 형태, 표면에 수분이 흡착된 형태, 소재 내부의 공간 틈(Pore) 사이에 물이 존재하는 형태 등과 같이 고분자에 존재하는 모든 형태의 물과 수증기에 대해 조사할 필요가 있다. 하지만, 본 논문에서는 이러한 형태적인 차이에 대해 구분하지 않고 고분자 내에 존재하는 전체 물의 형태에 관해 정량화를 하였음을 알린다.

3. 온도 의존적인 수분 흡습 특성

일반적으로 차단성 재질로 널리 활용되고 있는 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 재질을 이용하여 흡습 특성을 다양한 온도 및 습도 조건에서 실험적으로 조사하였다. Fig. 3은 포화 확산 농도가 상대 습도에 따라 선형적으로 비례하고 있음을 보여준다. 여기서, 45%RH에서는 온도의 영향에 독립적이거나 고습인 90%RH에 근접할수록 온도의 영향을 받는 특성을 보여준다. 포화 농도는 온도에 독립적이거나⁽¹³⁾ 또는 비독립적이라고⁽¹⁴⁾ 알려져 있다.

고분자에서 물의 용해 에너지와 물의 증발 에너지가 동일하다면 식 (3)에 보듯이 포화 농도는 온도에 무관하게 된다. 하지만, 물과 같은 극성 분자가 극성을 가지는 고분자로 흡수 될 때 용해 에너지는 특별히 커지고 고습에서 포화 농도가 온도에 의존하고 있음이 관측되었다.⁽¹⁴⁾ 본 실험에서 사용된 건조 온도는 60°C였고 사용된 PET 필름의 유리 전이 온도는 약 98°C로 측정되었다. 이것은 DMA(Dynamic Mechanical Analyzer)를 사용한 측정에서 확인되었다. Fig. 4 및 Fig. 5는 온도 및 습도에 따른 PET의 측정된 수분 확산성과 용해성을 각각 나타낸다. 아레니우스(Arrhenius) 식은 온도 및 활성화 에너지에 대한 화학적인 반응 특성들의 의존성을 일반적으로 잘 나타내어 준다. 아레니우스(Arrhenius) 관계식에 따라 측정된 데이터의 근사 기울기는 E_D/R 및 E_s/R 을 각각 나타낸다. 활성화 에너지에 의해 특성화된 영역들은 확산성을

차별화하고 그 영역은 고분자 소재의 유리 전이점과 연관되어 있다고 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ 즉, 유리 전이점을 전후로 활성화 에너지를 포함한 흡습 물성은 다소 급격한 변화를 겪게 된다. 측정된 확산성과 용해성의 활성화 에너지는 온도 및 습도에 상관없이 일정하였다. 이러한 사실은 일반적으로 문헌에 알려져 있고 본 논문에서 수행된 실험에서도 입증되었다.⁽²⁾ Fig. 4 및 Fig. 5에 있는 실험 데이터의 근사에서 y 절편은 확산성 및 용해성을 얻기 위한 조정 계수를 결정한다. 특성화된 흡습 물성은 Table 1에 나열되어 있다. 여기서, 포화 수증기압의 아레니우스 식의 형태 $P_{sat} = P_o \exp(E_{vp} / RT)$ 에서 얻어진 E_{vp} 는 실험적으로 알려져 있다.⁽²⁾

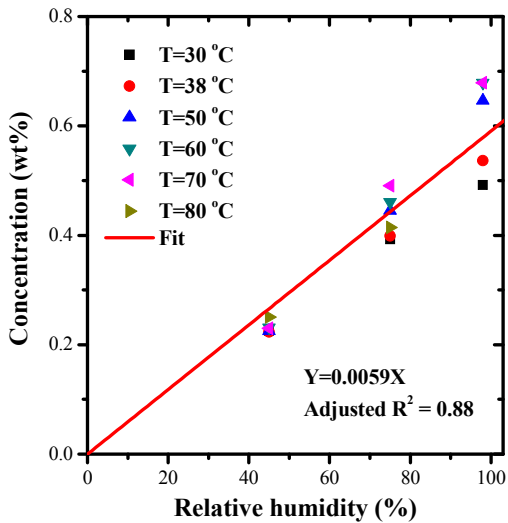


Fig. 3 Moisture concentration of PET as a function of relative humidity and temperature

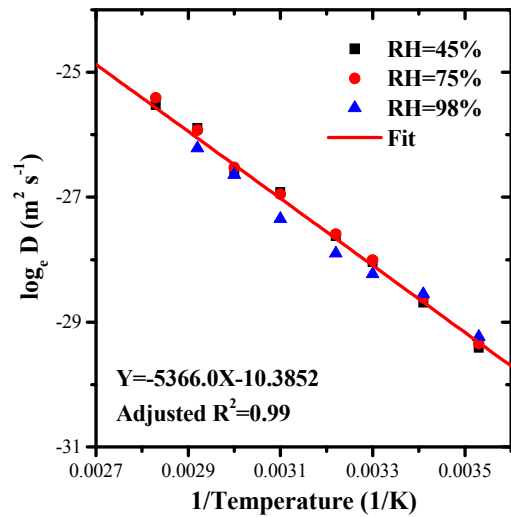


Fig. 4 Temperature dependent diffusivity of PET

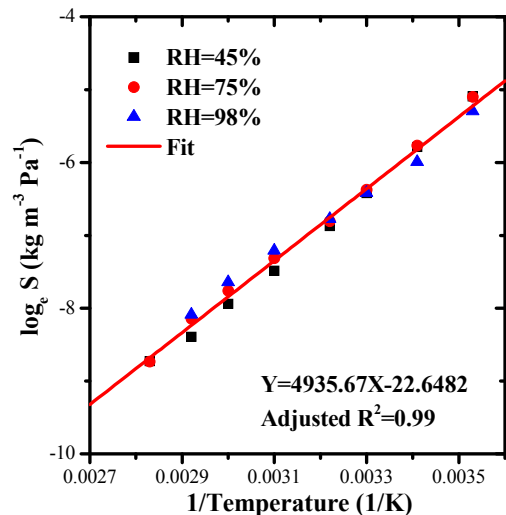


Fig. 5 Temperature dependent solubility of PET

Table 1 Characterization of moisture sorption properties of PET film according to Arrhenius equation

시편 크기	7mm×7mm×0.125mm
E_D	0.46 eV
E_S	0.42 eV
D_o	$2.75 \text{ m}^2 / \text{s}$
S_o	$1.59 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot \text{Pa}$
E_{vp}	0.45 eV

실험 결과는 포화 수증기압과 용해 활성화 에너지를 거의 동일함을 보여주고 있고 이것은 문헌에서의 내용과 일치한다.⁽²⁾ D_o, S_o 은 확산성 조정 계수, 용해성 조정 계수를 각각 나타낸다.

일반적으로 수분 투과율(Water Vapor Transmission Rate)은 소재의 두께에 반비례한다고 알려져 있고 투과성(Permeability)은 수분 투과율을 소재의 두께와 부분 수증기압으로 정규화 한다. Fig. 6은 온도에 따른 PET의 측정된 투과성을 보여준다. 시료의 두께로 수분 투과율은 정규화 되었으므로 두께에 따른 투과성의 차이는 관측되지 않았다. 투과성 계측기 구성의 제한으로 인해 100%RH에 대해 수분 투과성은 계측 되었음을 알린다. ASTM 표준 F1249에 따라 측정된 수분 투과성⁽¹⁶⁾은 열중량법을 통해 측정된 물성과 관계식 $P = D \cdot S$ 을 통해 예측된 수분 투과성 P 와 비교하였다. 측정된 수분 투과성은 고분자 소재 물성에 관한 문헌에 제시된 값과 비교할만한 수준이었다.⁽¹⁷⁾ 상호 비교를 위해 열중량법과 투과법으로 측정된 값에 대한 독립적 근사 및 전역(Concatenate) 근사를 각각 수행하였다. 근사를 통해 얻어진 R^2 및 자유도(Degree of freedom)를 이용하여 R^2 확률을 관계식을 통해 구하였다.⁽¹⁸⁾ 독립적 근사 및 전역 근사 모두 R^2 확률이 1에 근접한 값을 얻었다. 즉, 각각의 근사는 주어진 자유도에 따라 확률적으로 동일한 결과임을 알 수 있다. 즉, 측정된 투과성과 열중량법을 통해 예측한 투과성은 통계적으로 차이가 없음을 알 수 있다. 하지만, 주어진 데이터에서 보이는 차이는 수분 투과성 측정에서 가지고 있는 반복 오차(3%), 고온 측정 시 외부 챔버 내부에 원격 셀을 구성함으로 인한 오차, Fig. 4의 산포에 보이듯이 Non-Fickian 거동으로 인한 확산성 예측 오차 등의 원인으로 보인다.

4. Non-Fickian 흡습 특성

회로 기관과 같은 소재의 다층 구조에서 구리와 같은 무기물과 고분자가 경계 면을 가지는 경우에

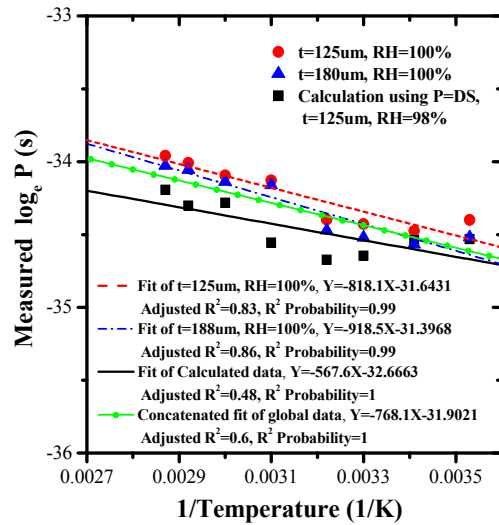


Fig. 6 Temperature dependent permeability in PET

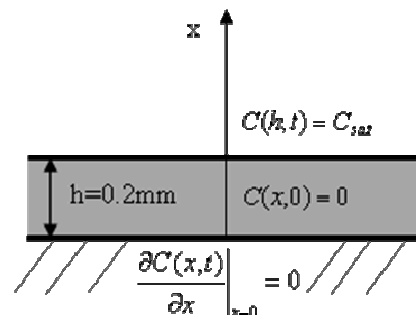


Fig. 7 1 Dimensional moisture diffusion problem

대한 수분 흡습 특성을 조사할 필요가 있다. 이것은 상, 하 양면이 외부 환경 조건에 노출되어 있는 경우와 달리 단면만 노출되어 있고 다른 한 면은 수분의 투과가 불가능하게 된다. Fig. 7은 단면 수분 확산에 대한 모델을 보여주고 있고 각 경계 조건 및 초기조건을 나타내었다. Non-Fickian 거동은 확산 농도에 의존한다고 일반적으로 알려져 있고 다음과 같이 서술되어 질 수 있다.⁽⁷⁾

$$D \sim \exp(aC) \tag{7}$$

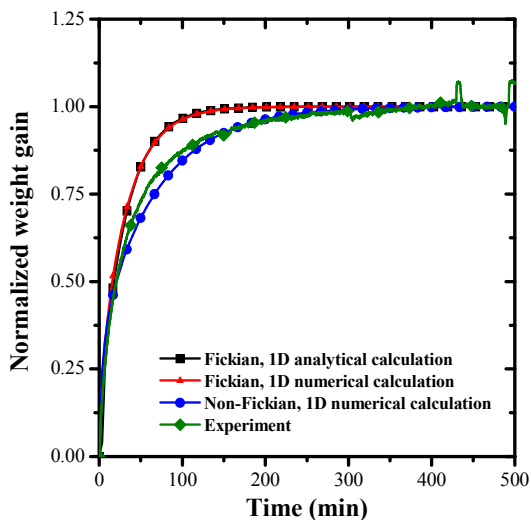
여기서 a 는 확산 농도 의존성에 연관된 지수 함수 상수이다. 식 (7)을 확산 지배 방정식인 식 (1)과 결합하여 확산 농도 의존적인 Non-Fickian 확산 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot [D_{oc} \exp(aC) \nabla C] \tag{8}$$

여기서 D_{oc} 는 확산 농도 의존성에 대한 무차원

Table 2 Parameterized non-Fickian diffusivity in acrylate polymer at 85 °C, 85%RH

시편 크기	3.1mm×1.5mm×0.2mm
재질	아크릴 계열 고분자
D (Fickian)	8.86E-12 m ² /s
S	0.000245 kg/m ³ ·Pa
D _{0C} (Non-Fickian)	0.2026
a (Non-Fickian)	0.2464

**Fig. 8** Characteristics of moisture absorption in acrylate polymer at 85 °C, 85%RH

조정 계수이다. Fickian 상수 D 는 이전 장에서 서술한대로 정확 해를 이용하여 양면 흡수에 따른 실험값과의 에러를 최소화 하여 얻고 난 후 Non-Fickian 상수들을 찾기 위해 단면 흡수에 따른 실험값과의 에러를 최소화 함으로써 식 (8)을 수치적으로 풀었다. Fig. 8 에서는 Fig. 7 에 보여준 형상에 대한 아크릴 계열 고분자의 측정된 수분 흡수량을 보여주고 있고 Fickian 모델 및 Non-Fickian 모델과 상호 비교하였다. Non-Fickian 모델에서 정규화된 흡습 수분량은 약 0.5 까지의 낮은 확산 농도에서는 Fickian 모델의 거동을 따르는 것으로 보이나 확산 농도가 증가 함에 따라 점차 확산 속도가 늦어짐을 관측하였다.

Non-Fickian 확산 모델에 따른 Fig. 8 에 대한 정량화된 확산 특성 값은 Table 2 에 나열되어 있다.

5. 결 론

전통적인 방법으로 측정이 어려운 박막 형상 고분자의 흡습 물성 특성을 열중량법을 이용하여 정

량화 하였고 수분 투과성과 비교하여 타당함을 보였다. 대표적 수분 차단 소재인 박막 형상의 PET 에 대해 온도, 습도에 따른 흡습 물성 특성을 평가 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열중량법을 이용하여 박막 형태의 고분자 소재인 PET 의 수분 질량을 온도, 습도에 따라 얻었고 온도에 따른 흡습 물성을 특성화 하는 아레니우스 식과 수분 농도가 수증기압과의 평형을 이루는 헨리(Henry)의 법칙에 따라 타당한 결과를 실험을 통해 얻었다.

(2) 열중량법을 통해 얻어진 흡습 물성을 특성화 하였고 측정된 수분 투과성과의 비교를 통해 얻어진 흡습 물성의 타당성을 보였다. 이러한 결과는 소재의 흡습 특성 평가 및 선택에 빠르고 합리적인 예측을 가능하게 한다.

(3) 확산 상수를 추정함에서 생기는 오차는 수분 확산 농도에 따른 확산성을 가지는 Non-Fickian 모델을 통해 최소화 하였고 비선형 특성 변수들을 수치적으로 구할 수 있었다.

(4) 얻어진 흡습 물성 및 특성은 신뢰성에 필수적으로 수반되는 온도, 습도 환경에서 소재로 침투되는 수분의 양을 예측 가능하게 하였고 실험과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) Galloway, J. E. and Miles, B. M., 1997, "Moisture Absorption And Desorption Predictions for Plastic Ball Grid Array Packages," *IEEE Trans. Comp. Packag. Manuf. Technol.*, Vol. 20, pp. 274~279.
- (2) Wong, E. H. and Rajoo, R., 2003, "Moisture Absorption and Diffusion Characterization of Packaging Materials-Advanced Treatment," *Microelectron. Reliab.*, Vol. 43, pp. 2087~2096.
- (3) Stellrecht, E., Han, B. and Pecht, M. G., 2004, "Characterization of Hygroscopic Swelling Behavior of Mold Compounds And Plastic Packages," *IEEE Trans. Comp. Pkg. Tech.*, Vol. 27, pp. 499~506.
- (4) Fan, X. J. and Lim, T. B., 1999, "Mechanism Analysis for Moisture-Induced Failure in IC Packages," *Proc. ASME IMECE 11th Symposium on Mechanics of Surface Mount Assemblies*, Nashville, Tennessee, pp.14~19.
- (5) Vitoratos, E., Sakkopoulos, S., Dalas, E., Paliatsas, N., Karageorgopoulos, D., Petraki, F., Kennou, S. and Choulis, S. A., 2009, "Thermal Degradation Mechanism of PEDOT:PSS," *Organic Electronics*, Vol. 10, No. 1, pp. 61~66.
- (6) Hodge, R. M., Edward, G. H. and Simon, G. P., 1996, "Water Absorption and State of Water in Semicrystalline

- Poly(Vinyl Alcohol) Films,” *Polymer*, Vol. 37, No. 8, pp.1371~1376.
- (7) Ruvolo-Filho, A. and Da Silva, A., 1998, “Transport of Dichloromethane in Poly(ether Imide) Films. Effect of the Solvent Activity and Temperature,” *J. Macromol. Sci. Phys.*, Vol. B37, pp. 349~363.
- (8) Ruvolo-Filho, A. and Murakami, M. M., 1998, “Transport Properties of Water in Glassy Polycarbonate Films. Effects of the Processing and Thickness,” *J. Macromol. Sci. Phys.*, Vol. B37, pp. 627~643.
- (9) Pasternak, R. A., Schimscheimer, J. F. and Heller, J., 1970, “A Dynamic Approach to Diffusion and Permeation Measurements,” *J. Poly. Sci.: Part A-2*, Vol. 8, pp.467~479.
- (10) Jang, C., Han, B. and Yoon, S., 2010, “Comprehensive Moisture Diffusion Characteristics of Epoxy Molding Compounds over Solder Reflow Process Temperature,” *IEEE Trans. Comp. Packag. Tech.*, Vol. 33, No. 4, pp. 809~818.
- (11) Comyn, J., 1985, “Polymer Permeability,” Elsevier Applied Science Publishers, New York.
- (12) ASTM D5229, 1998, “Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.”
- (13) Crossman, F. W., Mauri, R. E. and Warren W. J., 1978, “Advanced Composite Materials-Environmental Effects,” *ASTM STP*, Vol. 658, pp. 205~220.
- (14) Wolff, E. G., 1991, “Polymer Matrix Composites: Moisture Effects and Dimensional Stability,” *Int. Encyclopedia Comp.*, Vol. 4, New York, VCH Publishers, pp. 279~323.
- (15) Launay, A., ThomINETTE, F. and Verdu, J., 1999, “Water Sorption in Amorphous Poly(ethylene terephthalate),” *J. Appl. Pol. Sci.*, Vol. 73, p. 1131.
- (16) ASTM F1249, 1995, “Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film And Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor.”
- (17) Brandrup, J. and Immergut, E. H., 1989, “Polymer Handbook,” 3rd ed. Wiley, New York.
- (18) Evans, D. H., 1992, “Probability and Its Applications for Engineers,” Marcel Dekker Inc.