



# THEME 04

## 전자부품 플라스틱 패키지의 신뢰성과 습기 영향

임지혁 | 삼성전기 중앙연구소 수석연구원 | e-mail : jihyuk@samsung.com

박희진 | 삼성전기 중앙연구소 책임연구원 | e-mail : hee-jin.park@samsung.com

함석진 | 삼성전기 중앙연구소 기반기술 그룹장 | e-mail : sj.ham@samsung.com

폴리머 재료들이 포함된 전자 패키지의 신뢰성 문제는 습기의 영향이 매우 크다. 습기와 연관된 파손을 분석하기 위해서는 폴리머 재료들의 흡습 특성을 측정하는 것이 매우 중요하며, 습기 확산 메커니즘 및 폴리머의 손상과 접착력 저하에 대한 엄밀한 연구가 필요하다.

전자 패키지의 신뢰성(reliability) 문제에 있어서 많은 고장들은 그 원인이 습기(moisture)인 것으로 파악되고 있다. 전자 패키지의 폴리머 재료들은 대기 중의 습기를 흡수하게 되면 기계적 거동이 크게 영향을 받게 되며, 습기 환경에 노출된 전자 패키지에서는 여러 가지 타입의 파손 메커니즘이 발생한다. 대표적으로 팝콘현상(popcorn failure)이라 불리는 것이 있으며, 이는 패키지의 폴리머 재료에 흡수된 습기가 패키지 내의 미소한 기공이나 재료의 계면에 응축되어 있다. 고온의 리플로 소더링(reflow soldering) 과정에서 기화되어 압력을 발생시키기 때문에 일어난다. 220~280℃의 리플로 온도에서는 폴리머 재료들이 유리전이온도를 넘기 때문에 강성이 매우 저하되며 흡수된 습기에 의하여 계면의 접착력이 약화되기 때문에, 수증기압과 열응력 등의 복합적인 응력 효과에 의하여 계면이 박리(delamination)되면서 균열이 발생한다. 또한, 폴리머 재료들은 습기를 흡수하면 팽창하는 성질을 지닌다. 이러한 흡습 팽창(hygroscopic swelling)은 열팽창과 마찬가지로 재료의 부피에 변화를 가져오기 때문에, 열팽창계수의 차이에 의한 열응력과 매우 유사한 형태의 흡습 응력(hygroscopic stress)을 발생시킨다. 온습도 사이클에 장기간 노출되

는 환경에서는 습기에 의한 계면 접착력의 저하와 동반되면서 접착력이 약한 계면부터 흡습 응력과 열 응력에 의한 계면박리가 발생할 수 있다. 이외에도 침투된 습기에 의한 부식이 발생되어 전자 패키지의 기능에 손상이 일어나기도 한다.

습기의 영향으로 발생하는 이러한 파손들을 방지하기 위하여 패키지의 신뢰성 품질 확보를 검증하는 가속 시험이 시행되고 있으며, 전자 부품의 경우에는 J-STD-020D에 의하여 표준으로 규정된 습기/리플로 민감도 시험(moisture/reflow sensitivity tests)이 사용되고 있다. 이 시험 규정은 온도, 습도, 노출시간에 따른 표면실장형 부품의 습기민감도를 분류하여 해당부품의 작동환경에 따라 정의하고 있다. 또한, 전자부품의 외부로부터 침투하는 습기를 고온/고습을 통하여 가속하는 초가속 스트레스 시험(HAST: Highly Accelerated Stress Tests)이 쓰이고 있으며, 121℃/100% RH의 증기압 시험(PCT: Pressure Cooker Test)은 산업계에서 많이 사용되고 있는 대표적인 HAST 조건이다.

습기와 연관된 파손 메커니즘을 정확히 파악하기 위해서는, 전자 부품 플라스틱 패키지에 포함된 폴리머 재료들의 흡습 거동 특성을 측정하는 것이 매우 중요하다. 또한, 흡수된 습기에 의한 폴리머의 손상이나



접합력 저하에 대한 정량화가 필요하다. 이 글에서는 습기확산 메커니즘, 흡습 특성 측정방법, 플라스틱 패키지에서의 적용사례를 기술하고자 한다.

### 습기 확산 메커니즘

#### 픽(Fick)의 습기 확산 모델

수증기를 포함한 대부분의 기체분자들은 폴리머 중합 구조를 투과할 때 픽(Fick)의 법칙을 따른다. 픽의 법칙은 확산유량(diffusion flux, 단위면적 및 시간 당 확산된 물질의 양)이 물질의 농도 차이에 비례하여 일어난다는 것이다. 즉, 확산은 확산되는 물질의 농도가 높은 곳에서 낮은 쪽의 방향으로 진행되며, 그 속도는 두 곳의 농도차이에 정비례한다는 것이다. 이때, 농도 차이와 확산유량의 관계를 규정하는 비례상수를 확산상수(diffusion coefficient)라고 하며, 매질에 따라 각각 다른 값을 가지게 된다. 습기확산에 픽의 법칙을 적용하면, 확산물질의 농도는 습기농도  $C(\text{kg}/\text{m}^3)$ 로 정의되며 이에 해당하는 확산상수는 습기 확산 계수  $D(\text{moisture diffusion coefficient, m}^2/\text{s})$ 이다. 이러한 픽의 습기 확산 모델은 습기 확산 계수가 습기농도의 영향을 받지 않는 상수인 경우에 해당한다.

헨리(Henry)의 법칙은 포화 수증기 농도가 대기중의 수증기압과 폴리머 표면에서 평형을 이루는 현상을 나타내는 법칙이다. 즉, 매질에 함유되는 습기의 포화농도는 대기중의 수증기압에 비례한다는 것이다. 이때, 용해도 상수  $S(\text{solubility, s}^2/\text{m}^2)$ 는 대기 중의 수증기압과 포화 수증기농도의 비례상수이다.

픽의 습기 확산을 나타내는 두 개의 중요한 재료상수인 습기 확산 계수  $D$ 와 용해도 상수  $S$ 는 모두 온도에 따라 변화하는 재료 특성이다. 특히, 대부분의 습기 확산 계수와 용해도 상수 측정값의 로그를 취하여  $1/T$ 에 대하여 그래프를 만들면 직선을 얻을 수 있기 때문에 아레니우스(Arrhenius) 관계식을 따른다고 설명

한다. 온도가 높아질수록 습기확산계수는 커지며(확산속도가 빨라짐), 용해도 상수는 감소한다.(포화수증기 농도가 낮아짐)

#### 온도/습기 상사성(相似性, analogy)

흔히 푸리에의 법칙으로 알려진 열전달 방정식은 열유량이 온도구배에 비례하며 그 비례상수가 열전도도라고 정의된다. 즉, 열의 확산은 온도의 차이에 비례하여 일어난다는 것이며, 이는 앞서 설명한 픽의 습기 확산 모델과 매우 유사한 형태를 가진다. 따라서, 열과 습기의 확산에서의 이러한 상사성(analogy)을 이용하면 습기분포에 대한 해석을 열 분포에 대한 해석으로 바꾸어 적용할 수 있다. 현재 습기확산을 해석할 수 있는 상용의 수치해석 프로그램은 없기 때문에, 플라스틱 패키지의 습기 영향을 연구하는 연구자들은 ANSYS 혹은 ABAQUS 등의 열 분포 해석기능을 활용하여 패키지 내 습기분포를 시뮬레이션하고 있다.

### 흡습 특성의 측정

#### 흡습 특성 측정 방법

흡습 특성을 측정하기 위한 표준화된 방법은 시편을 주어진 온도와 습도 조건에 보관하면서 시간에 따른 질량변화를 정밀하게 기록하는 방식이다. 3차원의 직육면체(가로/세로/높이 =  $l/m/n$ ) 시편의 시간에 따른 흡습량의 변화를 각 방향의 습기 확산 계수  $D$ 의 값으로부터 이론적으로 계산할 수 있으며, 측정된 흡습 질량과 비교함으로써 습기 확산 계수를 추출할 수 있다.

재료에 따라서는 xyz 방향의 습기 확산 계수가 서로 다른 이방성을 보이는 경우도 있으므로, 시편을 1차원 혹은 2차원으로 습기가 확산된다고 가정할 수 있는 필름 형태로 제작하여 측정하는 방법 등으로 오차를 보완해야 한다. 용해도 상수  $S$ 는 시편의 질량이 습기로

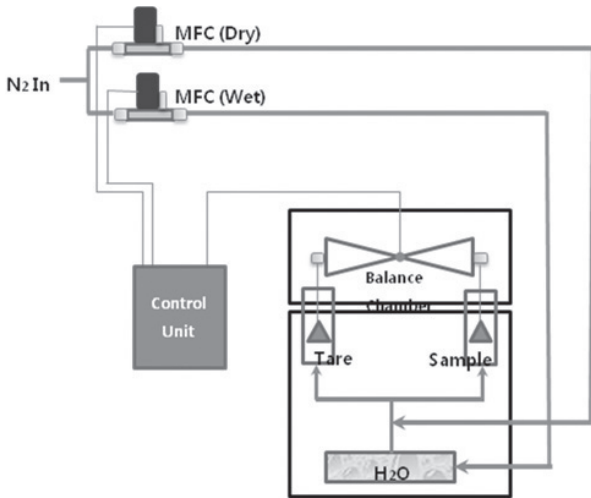


그림 1 열중량 분석기를 이용한 흡습 질량 측정 시스템의 개략도

포화된 값으로부터 구하게 된다.

### 열중량 분석기 측정

현재 흡습 특성을 측정하기 위한 장비는 항온항습 챔버와 정밀 저울이 주로 사용되고 있다. 주어진 온도와 습도에 보관된 시편을 일정 시간마다 꺼내어서 질량을 측정하고 다시 챔버에 넣는 과정을 반복한다. 이때, 대기 중에서 질량을 측정하는 과정에서 탈습이 일어나므로 변화된 흡습량으로 인하여 오차가 발생하게 된다. 전자 패키지에 사용되는 폴리머들은 얇은 필름 형태가 많고 경화된 시편을 크게 만들기 어렵다. 따라서, 질량 측정 시 탈습과정에서의 오차가 상대적으로 매우 크다. 이러한 문제점을 개선하고 정밀한 흡습 특성을 측정하기 위하여, 재료의 열에 따른 질량변화 특성을 평가하기 위하여 개발된 열중량 분석기(TGA: Thermo-gravimetric Analyzer) 장비를 이용하는 흡습 특성 측정방식이 최근에 도입되고 있다.

그림 1은 TA사의 Q5000SA 장비의 개략도를 나타낸 것이다. 온도와 상대습도가 조절되는 챔버에 샘플을 놓고 실시간으로 정밀하게 질량을 측정하게 된다.

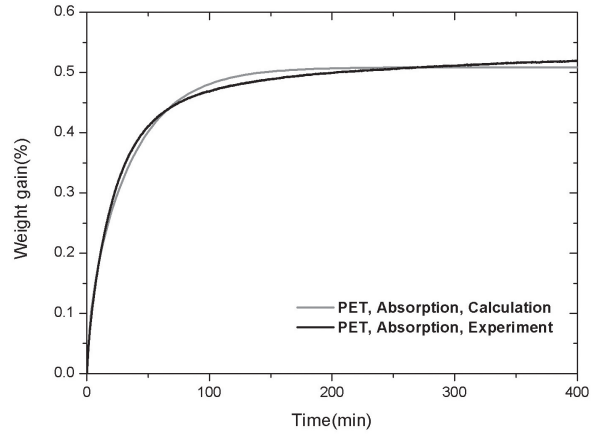


그림 2 37.5°C/98% RH 조건에서 PET 필름의 시간에 따른 흡습량 측정 결과

이때, 기준 저울과 샘플 저울을 상대비교하여 오차를 줄임으로써 0.1 μg의 정밀도를 확보하고 있다. 상대습도는 100% 수증기와 건조한 질소(N<sub>2</sub>) 기체의 비율을 통하여 조절한다.

그림 2는 두께 125 μm PET 필름의 흡습량을 37.5°C/98% RH 조건의 Q5000SA 장비에서 측정한 결과이다. 흡습량은 0.1wt% 이하에서도 매우 정밀하게 측정되고 있음을 알 수 있다. 필름의 습기 확산 모델을 적용하여 추출한 습기 확산 계수로 계산된 결과와 비교해 볼 때, 열중량 분석기를 이용하여 필름 형태의 작은 시편에 대한 흡습 특성 측정이 가능하였다.

### 플라스틱 패키지의 박리 사례

플립칩 패키지 기판과 에폭시 몰딩 컴파운드(EMC)의 박리 문제

흡습에 의해 박리나 균열이 일어나는 신뢰성 문제는 패키지가 얇아질수록 더욱 빈도가 높으며, 이는 외부로부터의 습기침투를 막아줄 수 있는 EMC나 기판의 두께가 얇기 때문이다. 그림 3은 칩 사이즈 플립칩 패키지에서 습기 민감도 시험 후에 나타나고 있는

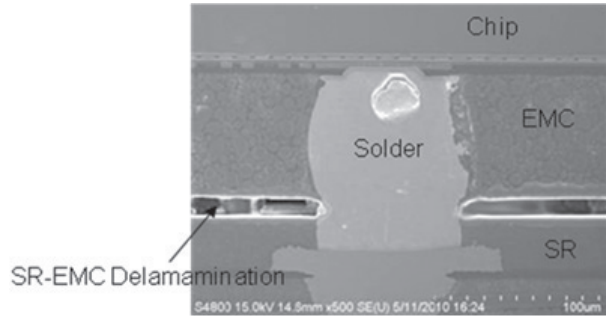
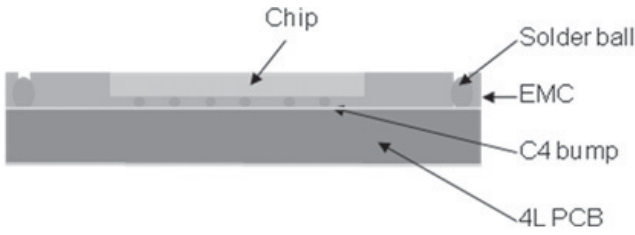


그림 3 플립칩 패키지 구조와 습기민감도 시험 이후의 박리 현상

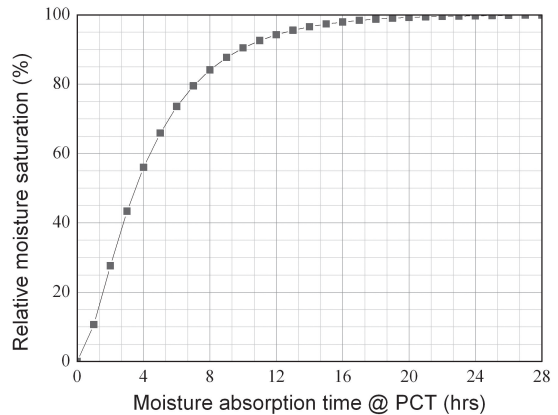
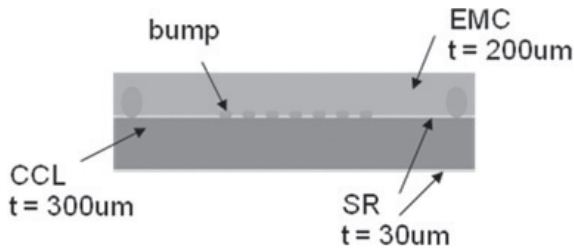


그림 4 시편 구조 및 PCT 보관 시간에 따른 SR-EMC 계면에서의 흡습량 시뮬레이션 결과

박리현상을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 솔더 레지스트(SR: Solder Resist)와 EMC 사이에서 박리가 발생하고 있으며, 기판의 폴리머 재료들을 통하여 흡수된 습기가 그 원인이 될 것으로 추정된다.

#### 습기 확산 계수와 용해도 상수 측정

위의 사례에서 흡수된 습기의 분포를 해석하기 위하여 패키지 내 각 재료들의 습기 확산계수와 용해도를 측정하였다. 폴리머 재료들은 SR과 EMC, 그리고 기판을 구성하고 있는 프리프렉(PPG: Pre-Preg)과 글라스 에폭시이다. 앞장에서 설명한 열중량 분석기를 이용하여 25 ~ 80℃ 사이의 5가지 온도에서 각각 습기 확산 계수와 용해도 상수를 측정하였고, 아레니우스

관계식을 활용하여 온도에 따른 흡습특성의 변화를 정량화하였다.

#### 흡습 해석 및 신뢰성 시험 결과와의 비교

측정된 흡습 특성을 이용하여 SR과 EMC 계면에 모이는 습기의 양을 상용 유한요소 프로그램 ANSYS로 해석하였다. 파손 해석을 단순화하고 SR-EMC의 계면 박리를 주로 분석하기 위하여 칩을 제외한 시편을 디자인하여 사용하였다. 습기의 영향을 가속하여 평가하기 위하여 PCT 조건(121℃, 100% RH)을 사용하였으며, PCT 보관 시간을 1시간에서 27시간까지 변화시키면서 SR-EMC 계면에서의 습기 농도를 해석하였다. 포화 습기농도에 대한 비율로 나타낸 SR-EMC 계면의

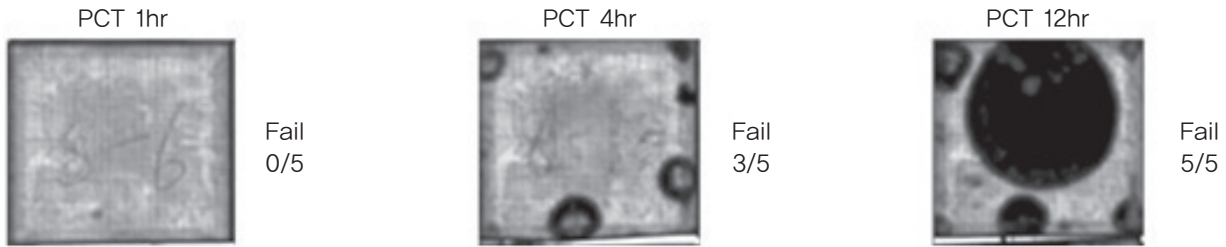


그림 5 초음파 주사현미경으로 관찰된 리플로 이후의 SR-EMC 계면박리 결과

습기분포 해석결과(그림 4)에 의하면, PCT 1시간 경과 후에는 습기가 SR-EMC 계면까지 침투하지 못하지만 (10% 이하) 4시간이 경과한 후에는 50% 이상의 습기 포화도를 나타낸다. 또한, PCT 12시간 경과 후에는 90% 이상 습기가 포화되고 있음을 보여준다.

초음파 주사현미경으로 관찰한 리플로 이후의 박리 결과는 습기 분포 해석결과와 부합된다(그림 5). 10% 이하의 습기 포화도에서는 SR-EMC 계면에서 박리가 일어나지 않으나, 50%를 넘는 습기 포화도에서는 60% 이상의 시편에서 박리가 관찰되고 있다. PCT 12시간 경과 후에는 모든 시편에서 박리가 관찰되므로 계면에서의 습기포화도가 박리의 직접적인 원인이 되고 있음을 나타낸다. 이상의 결과로부터 플립칩 패키지 기관의 SR과 EMC의 박리로 나타나는 신뢰성 불량 문제는 흡습에 의한 ‘팝콘’ 메커니즘으로 분석된다. 따라서, 파악된 신뢰성 문제를 바탕으로 SR-EMC 계면에 모이는 습기 확산을 막을 수 있는 재료의 변경과 구조설계의 개선이 필요하다는 것을 알 수 있다. 물론, 계면에서의 50% 습기 포화도가 모든 플립칩 패키지에 박리를 발생시키지는 않는다. SR과 EMC의 재료 조합에 따라 계면의 접착력 및 습기에 의한 저하 정도가 모두 다르기 때문이다.

### 토의 및 맺음말

습기가 원인으로 추정되는 박리 문제를 분석하기

위하여, 각 재료들의 흡습 특성을 온도에 따라 엄밀하게 측정하였으며, 온도-습기 상사성을 이용하여 수치 해석으로 결과를 도출하였다. 흡습특성 측정에 사용한 열중량 분석기(TGA)는 전자 패키지의 폴리머 재료 특성을 분석하기에 매우 적합한 방식이었으며, 측정된 결과를 바탕으로 수치해석된 습기 포화도는 습기 가속화 시험결과와 일치하였다.

이 글에서 살펴본 사례는 습기에 의한 파손 메커니즘에서 아주 단순화된 결과의 하나이며, 신뢰성 문제를 예측하고 방지하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

- 일부의 패키지 재료들은 픽의 습기 확산 모델과 다른 거동을 보이기도 한다. 이러한 재료의 경우에는 픽의 법칙에 의해서만 분석할 경우 습기 확산량의 오류가 발생하게 되므로, 습기 농도에 의해 확산계수가 달라지는 모델링을 적용하여야 한다.
- 흡수된 습기에 의한 팽창은 열응력과 마찬가지로 계면에 박리를 일으키는 주요 원인으로 작용하므로 흡습팽창률(hygroscopic swelling coefficient) 및 그에 따른 흡습 응력의 평가가 필요하다.
- 계면 박리를 예측하기 위해서는 습기의 분포뿐 아니라 계면의 접착력이 습기에 의하여 저하되는 현상까지 고려하여 평가하여야 한다. 여러 시도에도 불구하고 아직까지는 표준화된 평가법이 정립되지 못하였기 때문에 앞으로 많은 연구가 필요한 분야이다.