

## Al-Polymer 접합체의 흡습팽창에 대한 모아레 간섭 측정 및 수치해석

김기범<sup>1</sup>, 김용연<sup>\*</sup>  
<sup>1</sup>충북대학교 기계공학부

### Moire Interferometry Measurement and Numerical Analysis for Hygroscopic Swelling of Al-Polymer Joint

Kibum Kim<sup>1</sup>, Yong-Yun Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

**요약** 본 논문에서는 간단한 플라스틱전자패키지의 폴리머 흡습특성 평가 방법을 제시하였다. 흡습팽창에 의한 변형을 측정하고 유한요소법으로 해석하였다. 흡습특성 평가를 위해 시편제작을 제작하고, 흡습시간에 따라 폴리머에 내재된 수분질량을 측정하여, 수치해석 결과와 비교분석하였다. 흡습확산 방정식은 열전달 방정식과 유사한 형태를 가지고 있기 때문에 열전달 해석 절차에 따라 상용 유한요소코드를 적용하여 흡습압력비를 구하고, 자체코드로 흡습질량을 계산하였다. 비전도성 폴리머는 동일 제품이라도 생산시기에 따라 흡습특성에 변화가 있었다. 여러 가지 흡습특성에 대해 흡습질량을 수치해석으로부터 계산하고 측정치에 가장 근접한 흡습질량 변화의 그래프를 선택하여 최적의 확산계수와 용해도를 구하였다. 제시된 방법은 빠른 대응을 요구하는 생산현장에서 반도체 패키지 폴리머의 흡습특성을 신속하게 평가하는 데 적용될 수 있을 것이다. 또한 흡습팽창을 모아레 간섭계로 측정하고 수치해석으로 비교하였다. 결과적으로 흡습질량의 측정값과 수치해석 결과를 비교하여 용해도와 확산계수는 0.0320 [g/mm<sup>3</sup>/N]과 0.243 [mm<sup>2</sup>/μs]으로 결정하였고, ANSYS 구조해석에 의한 변형은 모아레 간섭에 의한 측정결과와 매우 유사하였다.

**Abstract** A simple method to evaluate the hygroscopic characteristics of polymer of microelectronic plastic package is suggested. To evaluate the characteristics, specimens were prepared, and the internally absorbed moisture masses were measured as a function of the absorbing time and calculated numerically. The hygroscopic pressure ratio was calculated by heat transfer analysis supported by commercial FEM code because the hygroscopic diffusion equation has the same form as the heat transfer equation. The moisture masses were then summed by the self developed code. The nonconductive polymers had quite different characteristics for the different lots, even though they were the same products. The absorbed moisture mass variations were calculated for several different characteristics, and the optimal curve of the mass variation close to experimental data was selected, whose solubility and diffusivity were affected by the hygroscopic characteristics of the material. The method can be useful in the industrial fields to quickly characterize the polymer material of the semiconductor package because the fast correspondence is normally required in industry. The weight changes in the aluminum-nonconductive-polymer joint due to moisture absorption were measured. The deformed system was also measured using the Moire Interferometry system and compared with the results of finite element analysis.

**Key Words** : FEM, Moire Interferometry, Moisture diffusion, NonConductive Polymer, Solubility

본 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원 사업에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Yong-Yun Kim(Chungbuk National Univ.)

Tel: +82-43-261-3353 email: [yykim@cbnu.ac.kr](mailto:yykim@cbnu.ac.kr)

Received March 14, 2014

Revised May 8, 2014

Accepted June 12, 2014

## 1. 서론

증기가 폴리머 소재에 흡수되면 물 분자는 수소분자의 결합 길이를 확장시켜 소재를 팽창하게 함으로써 플라스틱 전자 패키지에서 팽곤 현상이나 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 흡습 질량 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 고찰이 요구된다. 용해도가 유한 값을 갖는 이종소재의 흡습 해석은 많은 부분 연구 되었으나 [8-10], 금속-폴리머와 같이 용해도가 영인 소재의 접합체의 흡습해석에 대한 연구는 많지 않다. 최근 Kim[11]은 용해도가 영인 실리콘 또는 금속과 유한 값의 용해도를 갖는 폴리머 접합체의 흡습해석에서 발생하는 수치적 오차에 대해 고찰을 하였다. 열전달 방정식과 흡습확산 방정식에 대한 상사성과 접합면의 흡습질량의 불연속성을 고려한 확산 방정식을 고찰하고, Ansys 유한 요소 해석 코드의 열확산 해석 절차를 적용하여 알루미늄-비전도성 폴리머 접합체의 흡습변화를 해석하고 실험적으로 측정하였다. 본 논문에서는 반도체 패키지 소재 폴리머에 대한 흡습특성인 용해도(solubility)와 확산계수(diffusivity)를 고찰하였다. 반도체 패키지에 사용되는 폴리머의 흡습특성은 생산시기에 따라 차이가 있을 수 있기 때문에 흡습해석을 할 때는 소재의 특성을 재평가

해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 기 개발된 수치해석 절차로 흡습질량을 계산하고, 실험적으로 측정된 흡습질량을 비교분석하여 최적의 용해도와 확산계수를 구하는 절차에 대해 서술하였다. 또한 흡습팽창으로 인한 변형을 빛의 간섭계로 측정하고 수치해석 결과와 비교하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 흡습방정식

반도체패키지 소재로 구성된 폴리머 복합체에서 흡습 지배방정식은 일반 확산방정식으로부터 반체 소재의 특성을 고려하면 다음과 같은 편미분방정식으로 표현된다 [11].

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

여기서, 임의의 시간과 위치에서  $\phi(x_i, t)$  는 포화증기압에 대한 증기압의 비( $P/P_{sat}(T)$ )이고, D는 확산계수로 [ $m^2 s^{-1}$ ]의 단위를 갖고,  $S(T)$ 는 임의의 온도( $T$ )에서 용해도(solubility)이다. 임의의 시간과 임의의 위치에서 단위부피당 흡습질량은,

$$C(T, x_i, t) = P_{sat}(T) \phi(x_i, t) \quad (2)$$

로 표현된다. 식(1)에서 매질의 온도가 일정하면 확산계수와 용해계수는 상수가 되고, 열전달방정식,

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

으로부터 열확산계수( $\alpha$ )에 DS를 대입함으로써 온도( $T$ ) 대신에 압력비( $\phi$ )를 계산할 수 있고, 압력비를 식(2)에 대입함으로써 흡습질량을 계산할 수 있다.

### 2.2 변형해석

응력, 온도, 흡습의 환경변화에 대한 폴리머 복합체의 변형률은,

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{s,load} + \epsilon_{thermal} + \epsilon_{h,swell} \quad (4)$$

으로 표현된다. 여기서, 표면하중에 대한 변형률( $\epsilon_{s,load}$ )은 탄성법칙에 따라 계산된다. 온도변화에 대한 변형률( $\epsilon_{thermal}$ )과 흡습팽창변형률( $\epsilon_{h,swell}$ )은

$$\epsilon_{thermal} = \alpha \Delta T \tag{5}$$

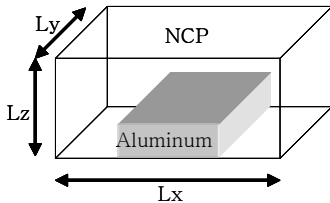
$$\epsilon_{h.swell} = \beta \Delta C \tag{6}$$

으로 표현되고,  $\alpha$  와  $\beta$  는 열팽창계수(CTE)와 흡습팽창계수(CHS)이다.

### 3. 흡습질량 측정 및 수치해석

#### 3.1 시편제작

흡습 질량 측정을 위해 몰딩-절단-연삭 세 단계를 거쳐 시편을 제작하였다. 소재알루미늄 미소판에 액상의 NCP를 몰딩 금형에 넣고 200 °C로 1 시간동안 가열한 후 상온에서 금형으로부터 분리하였다. 금형으로부터 분리된 시편은 다이아몬드 커터 60 rpm 으로 Fig. 2와 같이 좌우 대칭으로 절단하여 시편을 제작하였다. 샌드 페이퍼 600으로 연삭하여 치수를 조정하고, 최종적으로 Table 1에서 제시한 치수의 시편을 제작하였다.



[Fig. 1] Geometry of NCP/Aluminum Model

[Table 1] Model Dimension (unit: mm)

	NCP	Al
Length(Lx)	7.77	2.77
Height(Lz)	2.63	0.80
Thickness(Ly)	3.11	3.11

#### 3.2 흡습질량 측정

흡습질량 측정과 해석에 사용된 소재 시편은 Fig. 2에 표현된 구조를 가지고 있고 알루미늄과 패키지 소재인 비전도성 폴리머(nonconductive polymer)의 이종소재 구성되어 있다. 흡습질량을 측정하기 위해 먼저 대기 중에 보관된 시편은 수분을 가지고 있기 때문에 120 °C, 0%RH(상대습도)로 72시간 동안 흡습챔버(ESPEC SH-241)에 두어 수분을 제거하였다. 초기 질량을 측정 후 흡습챔버에 넣어서 증기를 시편이 흡수하도록 하였다. 흡습챔버를 24 °C, 상대습도 85% 로 유지시키고, 시편을

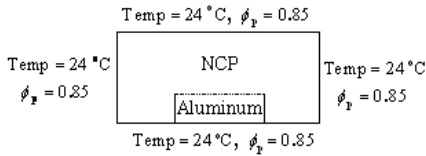
일정시간 흡습시킨 후 흡습질량을 측정하였다. 측정실의 온도는 24-25 °C, 상대습도는 37-40% 이다. 측정에 사용된 마이크로 바란스(Denver Instrument PI-225D)는 샘플의 부력에 의한 오차를 발생시킬 수 있을 정도로 정밀한 계측기기기 때문에 챔버에서 꺼낸 후 열전달이 잘 되는 물체에 접촉하여 가능한 신속히 상온에 이를 수 있도록 3-4분 정도 열을 방출시킨 후 3~4회 측정하여 평균값을 취하였다. Fig. 3는 흡습시간에 대한 흡습질량의 변화를 보여준다.

#### 3.3 유한요소 해석

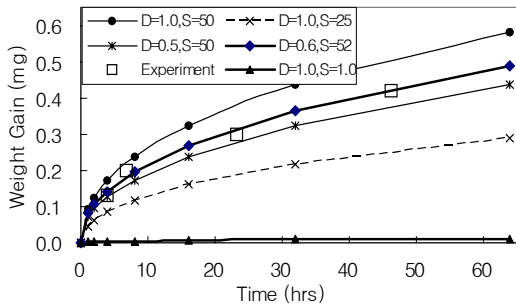
알루미늄-비전도성폴리머(NCP) 접합체의 흡습질량 확산 방정식은 식 (1)이고 ANSYS의 열전달 해석 절차에 따라 해석하고 그 결과를 분석하였다. 해석에 적용된 경계조건은 Fig. 2와 같이 24 °C, 상대습도 85%이다. 24 °C로 한 이유는 측정실의 항온 조건과 일치시키기 위함이다. 초기에 수치 해석에 적용된 소재의 흡습 특성은 Table 2와 같고 참고문헌[11]에서 적용된 소재특성이다. Table 2의 특성치로 수치해석의 결과인 흡습질량의 변화는 Fig. 3에서 보는 것처럼 큰 차이를 보였다. 실험에 사용된 NCP는 참고문헌[11]과 동일제품이나 생산 시기는 5년 이상의 차이가 있고, 두 개의 시편의 흡습 특성은 같지 않은 것으로 볼 수 있다. 따라서 시뮬레이션으로 실험 결과와 근접한 흡습특성을 구하기 위해 수차례 해석을 실시하였다. Fig. 3의 범례에서 D=1, S=1은 Table 2에서 제시된 용해도와 확산계수이고, D=0.6, S=52는 용해도를 Table 2에서 제시된 용해도의 52배, 확산계수의 0.6배임을 의미한다. Fig. 3에서 보는 것처럼 확산계수는 큰 차이가 없으나 용해도는 큰 차이가 있음을 볼 수 있다. 따라서 본 시편에 사용된 NCP의 용해도와 확산계수는 수분 질량의 측정값을 여러 가지의 용해도와 확산계수에 의한 수치해석 결과와 비교해볼 때, 기존제품의 52배의 용해도와 0.6배의 확산계수로부터 계산된 질량의 변화가 가장 측정값에 근접한 결과를 보이고 있다. 본 시편의 용해도와 확산계수는 0.0320 [g/mm/N]과 0.243 [mm<sup>2</sup>/μs] 임을 알 수 있다.

[Table 2] Material Properties of Product Lots

	NCP	Al
Diffusivity [mm <sup>2</sup> /s]	4.05E-7	6.55E-14
Solubility [g/mm/N]	6.16E-4	2.53E-11
Density [g/mm <sup>3</sup> ]	1.18E-3	2.33E-3



[Fig. 2] Boundary condition for pressure ratio analysis



[Fig. 3] Hygroscopic mass variation with respect time

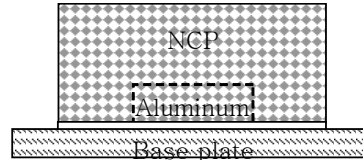
#### 4. 흡습변형 해석

반도체 패키지와 같은 작은 시편의 미세 변형은 빛의 간섭현상을 응용한 모아레 측정 방법이 일반적으로 적용되고 있다. 모아레 간섭 줄무늬로부터 변위를 측정하였고, 상용 유한요소 해석 코드로부터 흡습팽창에 의한 변형을 해석하고 비교하였다.

##### 4.1 격자형성

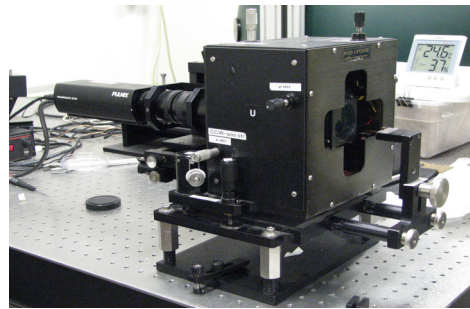
모아레 측정을 위해 Fig. 4의 시편은 baking-replication-separation 세 단계를 거쳐 측정하고자 하는 시편의 단면에 격자를 형성해야 한다. 먼저 준비된 흡습된 상태이기 때문에 120 °C 오븐에서 72시간 동안 탈습시킨다. mm당 1200개의 격자가 형성된 격자판에 F114 에폭시를 도포한 후 시편을 올려놓고 데시케이터에 보관하여, 24시간 경과 후 격자판과 시편을 분리시키면 격자판에 있는 격자가 측정하고자 하는 시편의 단면에 복제된다. 에폭시는 미세 두께로 도포되어야 하며 적절한 두께로 도포하기 위해서 작은 방울의 에폭시를 격자판에 떨어뜨린 후 렌즈 티슈 지를 2-3회 끌어서 편평한 층으로 도포해야 하고, 분리할 때도 망치와 같은 도구를 사용하여 한번에 분리시켜야 한다. 그렇지 않으면 분리시 작용하는 충격하중에 의해 변형이 발생할 수 있기 때문에 상

당한 경험이 요구된다. 격자가 복제된 시편은 다루기 용이하도록 Fig. 4와 같이 베이스 판위에 양면 테이프로 부착하였다.



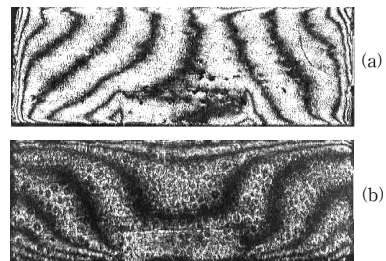
[Fig. 4] Grated sample on the base

##### 4.2 흡습변위 측정



[Fig. 5] Moire interferometry

Fig. 6은 흡습챔버에서 23시간 경과 후 Fig. 5의 모아레 간섭계로부터 변위를 측정한 사진이다. 흡습챔버는 24 °C 상대습도 85%로 유지하고, 측정실의 온도는 24-25 °C이기 때문에 온도에 의한 변위는 무시될 수 있고 흡습에 의한 변위만을 나타낸다. (a)는 수평방향의 변위, (b)는 수직방향의 변위를 나타낸다. 시편의 표면으로부터 흡습이 일어나고 내부로 확산되기 때문에 가장자리 근접영역에서 프린지 밀도가 높고, 대칭축으로 근접할수록 밀도가 낮음을 관찰할 수 있다. 특히 모서리 영역에서 수평방향이나 수직방향으로 최대 변위를 발생시키는 것을 관찰할 수 있다.



[Fig. 6] (a) U displacement, (b) V displacement for 23hrs of moisture absorption

변위장의 각 점에서 수평 변위와 수직 변위는 각각,

$$U = \frac{1}{2f_s} N_x \quad (7)$$

$$V = \frac{1}{2f_s} N_y \quad (8)$$

으로 표현된 식(7)-(8)로부터 계산할 수 있고, 변형률은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{2f_s} \frac{\partial N_x}{\partial x} \quad (9)$$

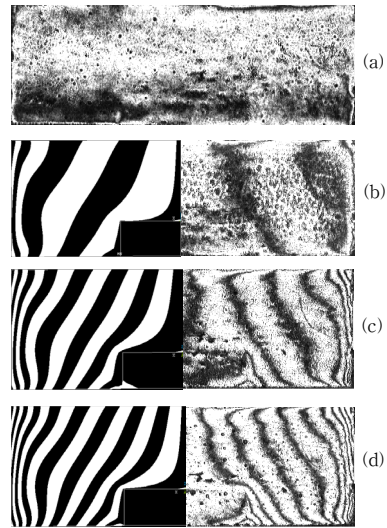
$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{2f_s} \frac{\partial N_y}{\partial y} \quad (10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2f_s} \left( \frac{\partial N_x}{\partial y} + \frac{\partial N_y}{\partial x} \right) \quad (11)$$

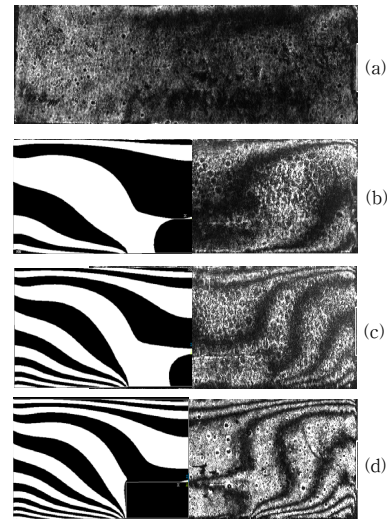
여기서  $f_s$  는 격자의 주기이고  $N_x$  와  $N_y$ 는 프린지의 개수이다.

### 4.3 흡습팽창 유한요소 해석

ANSYS에 내제된 “swell”서브루틴으로부터 흡습질량에 의한 팽창을 계산하였다. 흡습에 의한 팽창 변형률은 식(6)으로 표현된다. 폴리머 복합체의 구조해석을 위해서 적용한 흡습팽창계수, 프와송 비, 탄성계수는 각각 0.28, 0.3, 3180 MPa 이다. Fig. 7-8은 모아레 프린지와 수치해석결과를 비교한 그림이다. (a)에서 프린지가 없는 것은 초기 상태로 변위가 없음을 의미한다. (b), (c), 그리고 (d)는 흡습챔버에서 각각 7시간, 23시간, 그리고 47시간 경과 후 측정된 변위를 나타낸다. 시편의 표면으로부터 흡습이 일어나고 내부로 확산되기 때문에 가장자리 근접영역에서 프린지 밀도가 높고, 대칭축으로 근접할수록 밀도가 낮음을 관찰할 수 있다. 특히 모서리 영역에서 수평 방향이나 수직방향으로 최대 변위를 발생시키는 것을 관찰할 수 있다. 또한 알루미늄 기판은 흡습하지 않기 때문에 시편은 ‘ $\cap$ ’의 형태로 좌우 대칭으로 변형됨을 관찰할 수 있다. 유한요소 해석결과도 모아레 프린지와 매우 유사한 형상을 보인다.



[Fig. 7] U field of lefthand side FEM and righthand side Moire fringe: (a) null field (b) 7 Hrs (c) 23 Hrs (d) 47 Hrs



[Fig. 8] V field of lefthand side FEM and righthand side Moire fringe: (a) null field (b) 7 Hrs (c) 23 Hrs (d) 47 Hrs

## 5. 결론

알루미늄-NCP 시편을 제작하여 소재의 흡습특성을 고찰하였다. 흡습현상에 대한 이론적 고찰과 수치 해석 절차는 수차례 선행 논문으로부터 검증되었다. 흡습 질량만 측정하고 시뮬레이션 프로그램으로부터 해석 결과를 활용하여 충분히 합리적인 NCP의 용해도와 확산계수

를 구하였다. 또한 흡습변형을 모아레 간섭계로부터 측정하고 유한요소법에 의해 해석하였다. 생산 현장에서는 빠른 대응이 요구되는 만큼 본 논문에서 제시된 방법이나 절차는 현장에서 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 용해도나 확산계수는 흡습변형을 수치적으로 해석하는 데 활용될 수 있을 것으로 사료되고 궁극적으로 패키지의 신뢰성 해석에 활용될 수 있을 것이다. 또한 흡습해석 기술은 향후 폴리머패키지의 팽근현상 모델링에 활용될 것이다. 폴리머패키지는 수분을 흡수할 수 있는 미세홀을 가지고 있고, 미세홀은 흡수된 수분의 증기압에 의해 미세크랙으로 발전되고, 궁극적으로 파손되는 것으로 볼 수 있다. 이러한 팽근현상과 같은 파손을 먼저 이론적으로 고찰하고, 실험으로 확인하고자 한다.

## References

[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), p. 515, 1999.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/6040.784506>

[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), p. 499, 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCAPT.2004.831777>

[3] S. Lee and Y. Chang, "Viscoelastic Stress Analysis of Polymeric Thin Layer Under Moisture Absorption(in Korean)," J. Microelectron. Packag. Soc., 10(1), p. 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), p. 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), p. 274, 1997  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/95.623021>

[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), p. 122, 2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1461367>

[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.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2804090>

[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.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2837521>

[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.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2912181>

[11] Yongyun Kim, "A study of Hygroscopic Moisture Diffusion Analysis in Multimaterial System," Journal of the Microelectronics & Packaging Society, 18(2), p.11-15, 2011

### 김기범(Ki-Bum Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 충남대학교 선박해양공학과(공학사)
- 2003년 8월 : University of Florida, 기계공학과(공학석사)
- 2006년 8월 : University of Florida, 기계공학과(공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충북대학교, 기계공학부, 조교수

<관심분야>  
친환경 에너지 시스템

### 김용연(Yong-Yun Kim)

[정회원]



- 1982년 8월 : 연세대학교 기계공학과(공학사)
- 1989년 12월 : University of Toledo, 기계공학과 (MSME)
- 1993년 6월 : University of Cincinnati, 항공공학과 (Ph.D)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 충북대학교, 기계공학부, 교수

<관심분야>  
탄성파동 및 음-초음파 신호처리