

유연 기판 위 적층 필름의 굽힘 탄성계수 측정

이태익¹ · 김철규¹ · 김민성^{2,†} · 김택수^{1,†}

¹한국과학기술원 기계공학과

²아이콘즈

Measurement of Flexural Modulus of Lamination Layers on Flexible Substrates

Tae-Ik Lee¹, Cheolgyu Kim¹, Min Sung Kim^{2,†} and Taek-Soo Kim^{1,†}

¹Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),
291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

²I-CONS, 2466-18, Chungui-ro, Sinpung-myeon, Gongju-si, Chungcheongnam-do 32525, Korea

(Received August 9, 2016; Corrected September 25, 2016; Accepted September 27, 2016)

초 록: 본 논문에서는 폴리머 기반의 유연 기판 위 적층된 다양한 필름의 굽힘 탄성계수의 간접 측정법을 소개한다. 패키징 기판의 다양한 적층 재료들의 탄성계수는 기계적으로 신뢰성 있는 전자기기 개발에 결정적이지만, 기판과 매우 견고히 접합하고 있는 적층 필름을 온전히 떼어 내어 자유지지형(*free-standing*) 시편을 만들기 어렵기 때문에 그 측정이 쉽지 않다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 필름-기판의 복합체 시편에 대한 3점 굽힘을 진행하였고 시편 단면에 면적 변환법(*area transformation rule*)을 적용한 응력 해석을 수행하였다. 탄성계수를 알고 있는 기판에 대하여, 굽힘 시험으로 얻은 다층 시편의 강성으로부터 필름과 기판의 탄성계수 비를 계산하였으며, 전기 도금 구리 시편을 이용하여 양면 적층, 단면 적층의 두 가지 해석 모델이 실험 평가되었다. 또한 주요 절연체 적층 재료인 prepreg (PPG)와 dry film solder resist (DF SR)의 굽힘 탄성계수가 양면 적층 시편 형태로 측정되었다. 결과로써 구리 110.3 GPa, PPG 22.3 GPa, DF SR 5.0 GPa이 낮은 측정 편차로 측정 됨으로써 본 측정법의 정밀도와 범용성을 검증하였다.

Abstract: In this paper, we present an indirect method of elastic modulus measurement for various lamination layers formed on polymer-based compliant substrates. Although the elastic modulus of every component is crucial for mechanically reliable microelectronic devices, it is difficult to accurately measure the film properties because the lamination layers are hardly detached from the substrate. In order to resolve the problem, 3-point bending test is conducted with a film-substrate specimen and area transformation rule is applied to the cross-sectional area of the film region. With known substrate modulus, a modulus ratio between the film and the substrate is calculated using bending stiffness of the multilayered specimen obtained from the 3-point bending test. This method is verified using electroplated copper specimens with two types of film-substrate structure; double-sided film and single sided film. Also, common dielectric layers, prepreg (PPG) and dry film solder resist (DF SR), are measured with the double-sided specimen type. The results of copper (110.3 GPa), PPG (22.3 GPa), DF SR (5.0 GPa) were measured with high precision.

Keywords: lamination layer, flexural modulus, 3-point bending, electroplated copper, prepreg, solder resist

1. 개 요

최근 인쇄회로기판(*printed circuit board, PCB*)을 포함한 전자기기 패키징 기판들은 구리 동박과 여러 절연체가 적층된 형태를 갖는다. 적층 재료들의 기계적 물성은 신뢰성 있는 구조 설계와 완제품의 기계적 신뢰성 평가에 필수적이며, 특히 굽힘 탄성계수는 휨(*warpage*) 해석,

유연 기판의 신뢰성 해석 등에 핵심이 된다.¹⁻⁴ 또한 최근 투명 유연 디스플레이,^{5,6} 센서,^{7,8} 태양전지^{5,9} 등의 넓은 적용 범위를 가지면서, 박형 소자-유연 기판 구조에 대한 신뢰성 연구를 위한 물성 측정의 수요가 커지고 있다.

기판 위 코팅 또는 증착된 레이어의 대부분은 강한 접합력으로 기판에 들러 붙어 있어서, 적층 필름을 온전히 떼어 내지 못하여 필름 자체의 기계적 물성 측정이 어렵

[†]Corresponding author

E-mail: tskim1@kaist.ac.kr, acumen00@gmail.com

© 2016, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다.^{10,11)} 즉, 적층 필름을 자유지지형(free-standing)의 단일체(monolithic) 시편으로 만들기 어렵기 때문에, 최근 유연 전자 소자 개발에서도 도금 및 폴리머 열 압착 등의 적층 공정 후 필름 물성에 대한 연구에 제약을 받고 있다. 이를 해결하기 위해 나노인덴테이션 기법이 활용 될 수 있지만 국부적 측정이라는 한계로 인해 수~수십 μm 의 적층 필름의 본체 성질(bulk property)을 대표한다고 보기 어렵다. 다른 방법으로 폴리머 기판에 증착 된 수백 나노미터 두께의 금속 박막의 복합체를 인장하는 간접 측정법 등이 보고 된 바 있으나,^{12,13)} 면 방향 강성이 크고 연신율이 작은 박형 기판의 경우 인장을 위해 큰 힘이 필요하고, 이 때 그립 지그에서 시편 미끌림 현상에 의해 변형률 측정이 부정확해진다. 미끌림 방지를 위해 그립 힘을 과도하게 높이면 시편이 잘리고, 무른 film의 경우 그립 끝에서 film만 찢겨져 다층 시편에서 층간 iso-strain 가정을 만족하지 않게 된다.

이러한 실험적 한계들을 극복하기 위하여, 본 연구에서는 3점 굽힘 시험을 이용하여 적층 필름의 탄성 계수를 측정한다. 굽힘 시험은 기본적으로 시편 준비와 시험이 모두 간단하다는 장점이 있다. 인장시험과 같은 그립이 따로 필요가 없으며 면 수직방향 하중에 대한 변형을 시험으로써 적은 하중으로 정밀한 측정을 할 수 있다. 본 연구에서는 순수 박막 시편이 필요 없이, 기판의 탄성계수를 알 때 필름-기판 시편 또는 필름-기판-필름 시편 자체를 굽힘 시험하여 간단히 필름 탄성계수를 구하는 방법을 구축하였다. 면적 변환 법(area transformation rule)과 탄성계수의 기하적 독립성을 이용한 고체역학적 해석으로 필름의 굽힘 탄성 계수를 쉽게 측정하였으며, 검증을 위하여 전기 도금 구리, prepreg, dry film solder resist의 절연 재료가 사용되었다.

2. 실험 방법

2.1. 박형 기판의 3점 굽힘 시험

3점 굽힘 시험을 통하여 박형 기판의 굽힘 탄성계수를 먼저 측정하였다. 굽힘 탄성 계수($E_{flexural}$)는 시편 표면의 최대 굽힘 응력($\sigma_{flexural}$)과 최대 굽힘 변형률($\epsilon_{flexural}$)의 비율이며 아래 수식으로 계산 된다.

$$E_{flexural} = \frac{\sigma_{flexural}}{\epsilon_{flexural}} = \frac{L^3}{48I} \left(\frac{F}{D} \right) = \frac{L^3}{4wt^3} \left(\frac{F}{D} \right) \quad (1)$$

(지지점 거리 L , 시편 폭 w , 시편 두께 t , 단면 관성 모멘트 I , 하중 F , 굽힘량 D)

가운데의 하중점을 아래로 일정량 눌러주어 휨을 인가하고 측정 구간의 하중과 중심 굽힘량의 비 F/D , 즉, 그래프의 기울기를 측정하여 탄성 계수를 계산하였다. 시험 표준 ASTM D790, D 7264를 따라, 총 굽힘량은 표면 최대 변형률 r 값이 0.0035가 되도록 정하였으며 그 중 0.001-0.003 구간의 기울기 값을 탄성 계수 계산에 사용

하였다. 원하는 최대 변형률 r 을 얻기 위한 중심 굽힘량 D 는 아래 수식으로 정의된다.

$$D = \frac{rL^2}{6h} \quad (2)$$

두께 0.154 mm의 순수 기판 시편의 경우 약 370 μm 를 눌러 굽혔다가 펴주고, 굽힘량 110-330 μm 구간의 F/D 기울기를 계산하게 된다. 시편의 크기는 전체 길이 20 mm, 폭 5 mm로 커팅 플로터(Jaguar IV, GCC)를 이용하여 제작하였다. 시편의 두께는 1 μm 의 측정 한계를 갖는 마이크로미터를 이용하여 시편의 중심부 두께를 측정하였다. 단면 도금 시편의 구리 두께는 전체 두께에서 기판 두께를 빼주었고, 양면 도금 시편의 구리 두께는 상하 대칭의 두께를 가진다고 가정하여 계산하였다. 본 연구에서는 두께 0.154 mm의 절연체 기판(FR4)을 사용하였다.

굽힘 모멘트에 의한 탄성 거동만을 평가하기 위해서는, 특히 복합체 박판의 경우에, 3점 굽힘 시 지지점 거리를 충분히 넓혀서 면 수직 방향의 전단 파괴를 방지해야 한다.^{14,15)} 이에 더불어 하중점(loading nose)과 접촉하는 시편 표면에서의 국부적 소성 변형을 방지하기 위해 본 연구에서는 지지점 거리를 넓게 취하였다. 시험편 두께 대비 50배 이상의 지지점 거리를 확보하여 낮은 하중에서 시편이 쉽게 처지도록 실험이 진행되었다. 지지점 거리 10 mm, 하중 속도는 15 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 실험하였다. 높은 정밀도의 힘과 변위 측정을 위해 정밀 인장시험기(5965, INSTRON)를 사용하였으며 하중점 끝과 지지점 두 개의 끝이 0.25 mm의 반경을 갖는 전용 마이크로 굽힘 고정구(2810-411, INSTRON)를 사용하였다. 모든 실험은 5회 이상 수행하여 그 평균값으로 결과 값을 보고하였다.

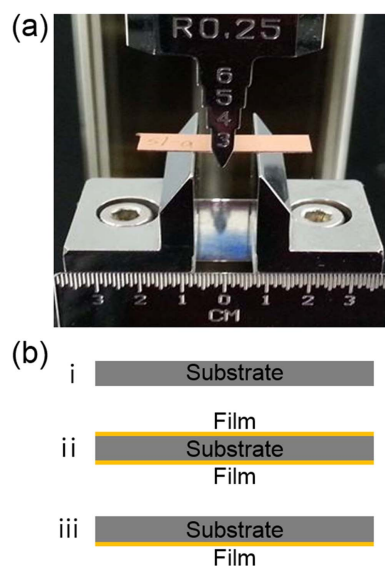


Fig. 1. (a) Micro-bending fixture for the 3-point bending test with thin specimens. (b) Three types of specimens, i) bare substrate, ii) double-sided specimen, and iii) single-sided specimen.

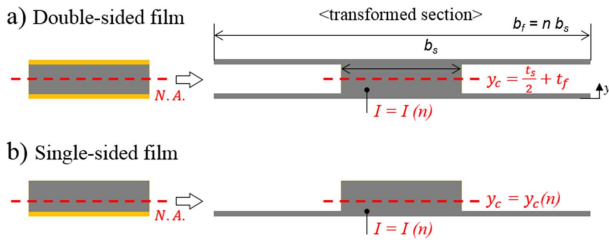


Fig. 2. Schematic of cross-section of actual specimen and transformed area for a) double sided film and b) single sided film.

2.2. 적층 필름 굽힘 탄성계수의 간접 측정법

Fig. 1(a)는 3점 굽힘 시험을 위한 시험 장비와 10 mm 거리의 지지점 위에 올려진 구리-절연체 기관의 시편 사진이다. Fig. 1(b)는 필름 물성을 측정하기 위해 사용 된 시편의 단면 구조이다. 기관과 양면, 단면 적층 시편의 세 종류이며, 기관 탄성계수를 알 때 양면 또는 단면 중 한 종류의 시편만 있으면 필름 탄성계수를 측정 할 수 있다. 적층 필름의 굽힘 탄성계수 측정은 아래의 순서로 이뤄진다.

1. 박형 기관의 탄성 계수 E_s 를 먼저 측정한다.
2. 필름 코팅 시편을 3점굽힘시험하고 중앙 굽힘량에 따른 하중의 기울기 F/D 를 구한다.
3. 필름의 탄성계수를 기관의 탄성계수의 n 배로 가정 하고($E_f = n E_s$) Fig. 2와 같이 시편 단면에 면적 변환법을 적용한다. 시편이 기관 재료로만 이뤄져 있다고 가정하고 필름의 면적을 x축 방향으로 n 배 확대 또는 축소시킨다.
4. 변환된 단면에 대해 중립면의 위치 y_c , 변환된 면적의 관성모멘트 I 를 각각 n 에 대한 식으로 나타낸다. Double-sided film의 경우 변환된 단면의 관성모멘트 I 는 다음과 같이 평행축 정리를 이용하여 계산 된다. 중립면이 변환 전후 모두 시편의 두께방향 중심에 위치하므로 다음과 같이 간단히 구해진다.

$$I = I(n) = I_s + 2I_f \tag{3a}$$

$$I_s = \frac{1}{12} b_s t_s^3 \tag{3b}$$

$$I_f = \frac{1}{12} b_f t_f^3 + b_f t_f \left(\frac{t_s + t_f}{2} \right)^2 \tag{3c}$$

where, $b_f = n b_s$

마찬가지로 Single-sided film의 경우에도 아래 식으로 관성모멘트를 계산 한다. 비대칭 구조로써 중립면의 위치가 가운데에서 벗어나게 되는데, 그 위치 또한 n 의 함수이기 때문에 관성모멘트 함수 $I(n)$ 의 차수가 커지게 된다.

$$I = I(n) = I_s + 2I_f \tag{4a}$$

$$I_s = \frac{1}{12} b_s t_s^3 + b_s t_s \left(t_f + \frac{t_s}{2} - y_c \right)^2 \tag{4b}$$

$$I_f = \frac{1}{12} b_f t_f^3 + b_f t_f \left(y_c - \frac{h_f}{2} \right)^2 \tag{4c}$$

$$y_c = t_f + \frac{t_s}{2} - \frac{t_f b_f}{2 b_s} \tag{4d}$$

where, $b_f = n b_s$

5. 위에서 구한 값들을 이용하여 탄성계수비 n 에 대한 아래 방정식을 풀고, $E_f = n E_s$ 의 관계로부터 필름 탄성계수를 구한다. 비대칭 시편의 경우 n 의 차수가 3차이므로, 두 허근을 버리고 실근을 취한다.

$$E_s = \frac{L^3}{48I(n)} \left(\frac{F}{D} \right) \tag{5}$$

2.3. 측정법 검증: Copper, prepreg, solder resist

본 측정법을 검증하기 위해 먼저 PCB용 Copper clad laminate의 전기 도금 구리의 탄성계수를 측정하였다. 위에서 분석한대로 양면 도금 시편과 단면 도금 시편을 각각 실험하여 분석 모델의 적합성을 평가하였다. 도금 구리의 두께는 30~40 μm 였으며 동일한 전류 밀도(3.5 ASD)로 도금되었다.

또한 패키징 기관의 주요 절연층인 prepreg (PPG), dry film sodler resist (DF SR)의 탄성계수 측정을 수행하였다. PPG와 DF SR의 한 층의 두께는 각각 26 μm , 11 μm 이며 실제 양산 기관 구조에 착안하여 양면 적층 시편을 사용 하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3는 기관 시편, 양면 도금 시편, 단면 도금 시편에 대한 3점 굽힘 시험의 하중-굽힘량 그래프이다. 표면 변형률을 같은 범위로 하기 위해 시편 전체 두께가 얇을수록 더 큰 굽힘량을 인가하게 된다.

세 종의 시편 모두 0.0035 변형률 내에서 힘/굽힘량 기울기를 구하기 위한 선형 거동을 보였다. 순수 기관 시편의 경우 F/D 기울기 값은 평균 1695 \pm 87 N/m로써 굽힘 탄성계수가 23.2 GPa로 측정되었다. 양면 도금 시편의 경

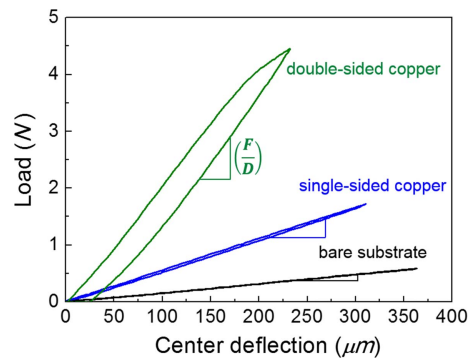


Fig. 3. Load-deflection graph of 3-point bending test for the three types of specimens; Double-sided copper, single-sided copper, and bare substrate.

Table 1. Measurement of elastic modulus of the electroplated copper films obtained by two types of specimens; Double-sided copper and single-sided copper.

Specimen type	Test #	Thickness [μm]			Slope (F/D) [N/m]	$n (= E_f/E_s)$	$E_f (=n E_s)$ [GPa]	E_f average [GPa]	Remark
		Total	Sub.	Cu					
Single-sided Cu	1	183	154	29	5863	4.47	103.7	$E_s = 23.2 \text{ GPa}$ $L = 10 \text{ mm}$	
	2	183	154	29	5923	4.52	104.9		
	3	182	154	28	5470	4.29	99.6		
Double-sided Cu	1	236	154	41	22603	4.75	110.2		
	2	235	154	40.5	22911	4.90	113.7		
	3	235	154	40.5	21672	4.61	107.0		

우 약 4.2 N에 도달할 때 소성변형이 발생한 것을 볼 수 있다. 같은 지지점 거리 10 mm로 시험이 수행 될 때, 추가된 도금 두께($2 \times 40.5 \mu\text{m}$)로 인해 전체 시편 두께가 $235 \mu\text{m}$ 수준으로 두꺼워지면서 수직방향 전단력이 커짐에 따라 구리층에 소성변형이 발견된 것으로 판단한다. 구리 도금 시편에 대한 탄성계수 측정 결과는 Table 1에 정리 되어 있다.

양면 도금, 단면 도금 시편의 F/D 기울기는 각각 $22395 \pm 645 \text{ N/m}$, $5752 \pm 246 \text{ N/m}$ 로 측정 되었다. 2.2장의 계산법으로 구한 탄성계수 비 n 값은 양면, 단면 시편 각각 4.75 ± 0.15 , 4.43 ± 0.12 였고, 이에 해당하는 구리의 탄성계수는 $110.3 \pm 3.4 \text{ GPa}$, $102.7 \pm 2.8 \text{ GPa}$ 로 측정 되었다. 이는 모두 문헌에 보고 된 전기도금 구리의 탄성계수 값인 $100 \sim 120 \text{ GPa}$ 일치하는 측정 결과임을 알 수 있다.¹⁶⁻¹⁸⁾ 또한 국부적 측정이 아닌 대면적 시료의 측정이기 때문에 측정값의 표준편차가 약 3으로 여러 참고문헌들과 비교하여 정밀한 결과가 도출됨을 확인하였다.

단면 시편과 양면 시편으로부터 구한 구리 탄성계수는 7.6 GPa 수준의 차이가 있는데, 이는 본 실험에서 사용된 기판의 구조 특성에서 기인한 것으로 판단한다. 0.154 mm 의 박형 FR4 기판은 단층(single-ply)의 유리섬유가 에폭시에 함침 되어 경화된 형태이다. 이는 중심부에 직조된 유리섬유가 위치하고 표면은 에폭시인 얇은 복합체인데, 그 내부 구조가 복잡하기 때문에 미시적 영역의 연구가 아닌 경우에 균질 재료로 가정하여 실질적인 거시적 물성을 측정한다. 2.2장의 해석 모델 또한 기판을 균질 재료로 가정하였는데, 본 모델이 고전 적층판 이론(classical laminate theory)을 따르며 이것은 각 박판을 유효 물성치(effective properties)를 갖는 등방성, 균질 재료로 해석하기 때문이다.^{19,20)} 이는 단면 적층(single sided film) 시편의 응력해석 모델의 경우 중립축의 위치, 표면 최대 응력, 표면 최대 변형률이 실제 값과 조금씩 차이가 생기기 때문에 측정 물성에 오차를 유발 한다. 따라서 FR4와 같은 두께방향 비균질성 재료를 쓰는 경우 단면 적층 시편보다는 실제 공정 단계에서 쉽게 얻어지는 양면 적층 시편으로 시험하는 것이 권유 된다. 또한 기판이 복합재료인 FR4가 아닌 polyimide, polyethylene terephthalate 등

의 균질 재료인 경우에는 양면, 단면 필름 증착 형상에 따른 측정 값 차이가 더욱 줄어들 것이다.

또한 굽힘 탄성계수의 계산에는 식 (1)에서 보듯이 시편 두께의 세제곱이 적용되어, 정밀한 두께 측정이 매우 중요하다. $1 \mu\text{m}$ 의 치수 입력 차이가 탄성계수 값에 큰 영향을 주기 때문에 시편 단면을 직접 폴리싱하여 두께를 이미지 측정하는 등의 방법을 사용한다면 더욱 정확한 결과를 얻을 것이다.

마지막으로 도금 구리층 외에 PPG, DF SR 양면 적층 시편으로 각 절연층의 탄성계수를 측정하였다. Fig. 4(a)는 Cu, PPG, SR이 양면 적층 된 기판을 플로터로 절단하여 준비 중인 시험편들의 사진이다. 각 적층 레이어의 굽힘 탄성계수 측정 결과가 Fig. 4(b)에 나타나 있다. 탄성계수 비 n 값은 PPG, DF SR 각각 0.96 ± 0.06 , 0.22 ± 0.03 였고, 이에 따라 탄성계수는 PPG, DF SR 각각 $22.3 \pm 1.4 \text{ GPa}$, $5.0 \pm 0.7 \text{ GPa}$ 로 측정되었다. 즉, 전기 도금 구리, PPG, DF SR 세 종류의 시편 물성 측정을 통하여 $5 \sim 110 \text{ GPa}$ 의 넓은 탄성계수 범위에서 본 측정법이 측정값 편차

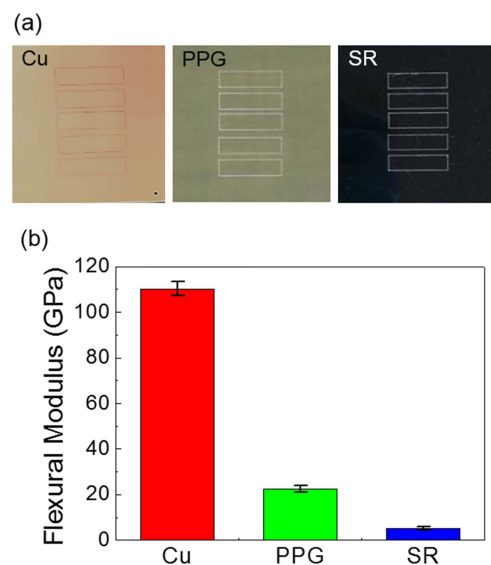


Fig. 4. (a) Three types of lamination film-substrate specimens; copper, prepreg, dry film solder resist. Specimen unit size is $5 \times 20 \text{ mm}$. (b) Flexural modulus of the copper, prepreg, solder resist specimens obtained by the indirect method.

5% 내외의 높은 정밀도를 보였음을 확인하였다.

DF SR은 product datasheet에 제공된 modulus가 5 GPa로 측정 결과와 일치한 반면, PPG의 경우 제공 물성이 28 GPa로써 측정된 22.3 GPa이 업체 물성에 비해 약 20% 작은 값을 알 수 있었다. 이는 PPG의 업체 제공 물성이 인장 탄성계수이며 측정한 굽힘 탄성계수가 낮은 재료 구조를 갖기 때문이다. 절연 적층 재료인 PPG는 역시 FR4 구조인 중심의 유리섬유 층과 표면의 레진으로 구성된 복합체이기에 유리섬유 직조 방향에 대한 강성에 비해 굽힘 변형에 대한 강성이 낮은 것이 알려져 있다.¹⁵⁾ 워피지 등의 변형 이슈가 많은 박형 기판 및 적층 재료에 대해서는 굽힘 탄성계수를 쓰는 것이 더 정확한 휨 예측과 잔류응력 계산이 가능하므로 본 연구의 탄성계수 측정법이 유용하게 사용 될 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 박형 기판 위 적층 된 다양한 패키징 재료의 탄성계수를 필름-기판 시편을 이용한 3점 굽힘 시험으로 측정하였다. 면적 변환법을 적용한 고체역학적 응력해석으로 간접측정법을 구축하였으며, 기판의 굽힘 탄성계수를 알고 있는 경우 별도의 단일 필름 시편 제작이 필요 없이 적층 된 상태로 본체 성질을 구할 수 있는 장점이 있다. 양면, 단면 전기 도금 된 구리의 탄성계수 측정으로 본 측정법을 검증하였으며 측정 결과는 문헌 값과 잘 일치하였다(110.3 GPa). 또한 비교적 굽힘 탄성계수가 낮은 주요 절연 필름 prepreg (22.3 GPa), dry film solder (5.0 GPa)도 낮은 측정 편차로 측정되어 넓은 탄성계수 범위에서의 측정 정밀도를 검증하였다. 본 탄성계수 측정법은 적용 범위가 넓어지고 있는 박막 소자-유연 기판 시스템의 신뢰성 향상 연구에 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

This work was supported by Basic Science Research Program (2015R1A1A1A05001115) and Wearable Platform Materials Technology Center (2016R1A5A1009926) funded by the National Research Foundation (NRF) under the Ministry of Science, ICT and Future Planning (MSIP), and the Graphene Materials and Components Development Program of MOTIE/KEIT (10044412, Development of basic and applied technologies for OLEDs with graphene).

References

1. C. Kim, T.-I. Lee, M. S. Kim and T.-S. Kim, "Warp analysis of electroplated Cu films on fiber-reinforced polymer packaging substrates", *Polymers*, 7, 985 (2015).
2. M.-K. Lee, I.-W. Suh, H.-S. Jung, J.-H. Lee and S.-H. Choa, "Warp of Flexible OLED under High Temperature Reliability Test", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 23, 17 (2016).
3. C. Kim, H. Choi, M. S. Kim and T.-S. Kim, "Packaging Substrate Bending Prediction due to Residual Stress", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20, 21 (2013).
4. H.-S. Jung, K. Eun, E.-K. Lee, K.-Y. Jung, S.-H. Choi and S.-H. Choa, "Flexible Durability of Ultra-Thin FPCB", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21, 69 (2014).
5. J. Jin, J. H. Ko, S. Yang and B. S. Bae, "Rollable Transparent Glass-Fabric Reinforced Composite Substrate for Flexible Devices", *Adv. Mater.*, 22, 4510 (2010).
6. H. Y. Kim, J. Jin, S.-H. Ko Park, I.-Y. Eom and B.-S. Bae, "350 C processable low-CTE transparent glass-fabric-reinforced hybri-mer film for flexible substrates", *J. Inf. Disp.*, 16, 57 (2015).
7. W.-Y. Chang, T.-H. Fang, H.-J. Lin, Y.-T. Shen and Y.-C. Lin, "A large area flexible array sensors using screen printing technology", *J. Disp. Technol.*, 5, 178 (2009).
8. N. T. Tien, S. Jeon, D. I. Kim, T. Q. Trung, M. Jang, B. U. Hwang, et al., "A flexible bimodal sensor array for simultaneous sensing of pressure and temperature", *Adv. Mater.*, 26, 796 (2014).
9. M. Abdelfatah, J. Ledig, A. El-Shaer, A. Wagner, A. Sharafeev, P. Lemmens, et al., "Fabrication and characterization of flexible solar cell from electrodeposited Cu 2 O thin film on plastic substrate", *Sol. Energy*, 122, 1193 (2015).
10. A. S. M. Ang and C. C. Berndt, "A review of testing methods for thermal spray coatings", *Int. Mater. Rev.*, 59, 179 (2014).
11. P. Hollman, M. Larsson, P. Hedenqvist and S. Hogmark, "Tensile testing as a method for determining the Young's modulus of thin hard coatings", *Surf. Coat. Technol.*, 90, 234 (1997).
12. F. Avilés, L. Llanes and A. Oliva, "Elasto-plastic properties of gold thin films deposited onto polymeric substrates", *J. Mater. Sci.*, 44, 2590 (2009).
13. F. Macionczyk and W. Brückner, "Tensile testing of AlCu thin films on polyimide foils", *J. Appl. Phys.*, 86, 4922 (1999).
14. G. Tolf and P. Clarin, "Comparison between flexural and tensile modulus of fibre composites", *Fibre Sci. Technol.* 21, 319 (1984).
15. T.-I. Lee, C. Kim, M. S. Kim and T.-S. Kim, "Flexural and tensile moduli of flexible FR4 substrates", *Polym. Test.*, 53, 70 (2016).
16. A. Volinsky, J. Vella, I. Adhihetty, V. Sarihan, L. Mercado, B. Yeung, et al., "Microstructure and mechanical properties of electroplated Cu thin films", *MRS Proc.*, 649, Q5.3 (2000).
17. B. Weiss, V. Gröger, G. Khatibi, A. Kotas, P. Zimprich, R. Stickler, et al., "Characterization of mechanical and thermal properties of thin Cu foils and wires", *Sens. Actuators, A*, 99, 172 (2002).
18. Y. Denis and F. Spaepen, "The yield strength of thin copper films on Kapton", *J. Appl. Phys.*, 95, 2991 (2004).
19. Reddy, JN, "Mechanics of Laminated Composites Plates and Shells: Theory and Analysis", 2nd ed., CRC Press, New York, (2004).
20. Tao Zhou, Pulin Nie, Heping Lv, Qilong Chen and Xun Cai, "Assessment of elastic properties of coatings by three-point bending and nanoindentation", *J. Coat. Technol. Res.*, 8, 355 (2011).