

Island-Bridge 구조의 강성도 경사형 신축 전자패키지의 유효 탄성계수 및 변형거동 분석

오태성[†]

홍익대학교 공과대학 신소재공학과

Analysis on Effective Elastic Modulus and Deformation Behavior of a Stiffness-Gradient Stretchable Electronic Package with the Island-Bridge Structure

Tae Sung Oh[†]

Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea
(Received November 11, 2019; Corrected December 12, 2019; Accepted December 13, 2019)

초 록: Polydimethylsiloxane (PDMS)를 베이스 기판으로 사용하고 이보다 강성도가 높은 flexible printed circuit board (FPCB)를 island 기판으로 사용하여 island-bridge 구조의 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지를 형성하고, 이의 유효 탄성계수와 변형거동을 분석하였다. 각기 탄성계수가 0.28 MPa, 1.74 MPa 및 1.85 GPa인 soft PDMS, hard PDMS, FPCB를 사용하여 형성한 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지의 유효 탄성계수는 0.58 MPa로 분석되었다. Soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지에서 soft PDMS의 변형률이 0.3이 되도록 인장시 hard PDMS와 FPCB의 변형률은 각기 0.1과 0.003이었다.

Abstract: A stiffness-gradient soft PDMS/hard PDMS/FPCB stretchable package of the island-bridge structure was processed using the polydimethylsiloxane (PDMS) as the base substrate and the more stiff flexible printed circuit board (FPCB) as the island substrate, and its effective elastic modulus and stretchable deformation characteristics were analyzed. With the elastic moduli of the soft PDMS, hard PDMS, and FPCB to be 0.28 MPa, 1.74 MPa, and 1.85 GPa, respectively, the effective elastic modulus of the soft PDMS/hard PDMS/FPCB package was analyzed as 0.58 MPa. When the soft PDMS of the soft PDMS/hard PDMS/FPCB package was stretched to a tensile strain of 0.3, the strains occurring at hard PDMS and FPCB were found to be 0.1 and 0.003, respectively.

Keywords: stretchable package, stretchable substrate, PDMS, FPCB, elastic modulus, stretchable deformation

1. 서 론

최근 인공 센싱피부, 스킨패치형 센서, 생의학 전극, 스마트 의류, 전자 눈(electronic eyes), 밴딩 액츄에이터, 스마트 헬스케어용 웨어러블 기기 등과 같이 다양한 용도에 응용하기 위해 유연성과 함께 신축성을 지닌 신축성 전자소자에 대한 요구가 급격히 증대하고 있다.¹⁻¹⁵⁾ 이와 같은 요구에 부응하기 위해 전자 패키지 기술이 딱딱하고 변형이 어려운 printed circuit board(PCB) 기판으로부터 어느 정도의 굽힘이 가능한 flexible printed circuit board (FPCB)를 기판으로 한 유연 패키지를 거쳐 궁극적으로는 형상 자유도를 구현할 수 있도록 polydimethylsiloxane

(PDMS)와 같은 탄성 고분자를 기반으로 한 신축 패키지로 발전을 거듭하고 있다.¹⁻¹⁵⁾

모든 부위가 신축성을 갖는 신축 전자패키지를 완벽하게 구현하기 위해서는 신축기판, 신축배선과 더불어 신축성 부품기술이 요구된다. 유기물 반도체를 포함한 유기물 전자부품을 개발하고자 하는 연구들이 진행되고 있으나, 이들의 특성이 Si 반도체와 기존 전자부품들에 비해 매우 떨어지기 때문에 이들을 전자 패키지 공정에 적용하는 것이 매우 어려운 실정이다.^{5,16)} 이를 해결하기 위해 Si 반도체와 같이 딱딱하고 신축성이 없는 기존 전자부품들을 강성도가 높은 island 기판에 실장한 후, island 기판들을 신축성 탄성고분자 기판 내에 배열하고 이들 사

[†]Corresponding author
E-mail: ohts@hongik.ac.kr

© 2019, 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.

이를 신축패션을 사용하여 연결한 island-bridge 구조의 신축 패키지가 개발되고 있다.^{3,4,17-23} Island-bridge 구조의 신축 패키지에서 신축변형이 발생하는 신축성 베이스 기판으로는 PDMS가 주로 사용되고 있으며 신축변형이 억제되는 island 기판으로는 FPCB가 주로 사용되고 있다.^{3,4,17,19,20-22} 최근에는 island 기판과 PDMS 베이스 기판 사이의 계면 박리를 억제하기 위해 FPCB보다 강성도가 낮은 polytetrafluoroethylene (PTFE)를 island 기판으로 사용한 island-bridge 구조의 신축 패키지에 대한 연구도 보고되고 있다.²⁴

신축성과 장시간 신뢰성이 우수한 Island-bridge 구조의 신축 패키지를 개발하기 위해서는 강성도가 낮아 바다(sea) 역할을 하는 PDMS와 강성도가 높아 island 역할을 하는 FPCB를 조합한 신축 패키지의 탄성 특성에 대한 이해가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 island-bridge 구조의 신축 패키지를 개발하기 위한 기본연구로서 강성도가 각기 0.28 MPa, 1.74 MPa와 1.85 GPa인 soft PDMS, hard PDMS와 FPCB를 사용하여 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 구조의 강성도 경사형 신축 패키지를 형성한 후의 유효 탄성계수와 변형거동을 분석하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1과 Fig. 2에 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지의 모식도와 제작공정 모식도를 나타내었는데, 이에 대한 설명은 이전 논문에 자세히 기술하였다.^{3,4,22} 본 연구에서 사용한 FPCB는 크기 8 mm×30 mm이며, 총 두께는 78 μm로 45 μm 두께의 폴리이미드, 18 μm 두께의 Cu daisy-chain 패턴과 15 μm 두께의 포토솔더 레지스트로 이루어져 있다.^{3,4,22} FPCB에는 직경 135 μm, 피치 600 μm인 42개의 본딩패드가 있으며, 4 μm 두께의 무전해 Ni와 30 nm 두께의 immersion gold (ENIG)로 표면처리되었다.^{3,4,22} Fig. 2(a)와 같이 acrylic-silicone 양면테이프의 acrylic adhesive가 형성되어 있는 면을 FPCB에 접착시켰다. Dow Corning Sylgard 184의 base와 curing agent를 10 : 1의 비율로 2,000 rpm에서 3분간 혼합하고 60°C에서 20분 유지하여 hard PDMS로 반경화시킨 후, 그 위에 Fig.

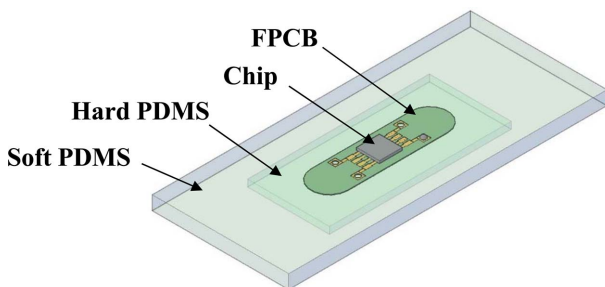


Fig. 1. Schematic illustration of the stiffness-gradient stretchable package consisting of the soft PDMS, hard PDMS, and FPCB.

2(b)와 같이 acrylic-silicone 양면테이프를 붙인 FPCB를 양면테이프의 silicone adhesive 면이 반경화 PDMS를 향하게 부착하였다. 그런 다음 Fig. 2(c)와 같이 FPCB가 부착된 반경화 PDMS를 60°C에서 12시간 유지하여 hard PDMS로 완전 경화시켰다. 두께 1 mm인 hard PDMS/FPCB 기판을 18 mm×40 mm 크기로 다이싱하여 Fig. 3과 같은 hard PDMS/FPCB 신축기판을 제작하였다.^{3,22} 이와 같은 hard PDMS/FPCB 기판에 전도성 입자로서 Au 코팅된 폴리머 볼을 함유하고 있는 anisotropic conductive adhesive (ACA)를 사용하여 160°C에서 10 MPa의 본딩압력을 인가하며 150초간 유지하여 Si 칩을 플립칩 본딩하였다. 그런 다음 Fig. 2(d)와 같이 Si 칩을 본딩한 hard PDMS/FPCB를 패트리 디쉬에 놓고 그 위에 Sylgard 184의 base와 curing agent를 20 : 1의 비율로 혼합한 액상 soft PDMS를 부었다. 그런 다음 액상 soft PDMS를 60°C에서 12시간 동안 유지하여 완전 경화시켜 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 구조의 강성도 경사형 신축 패키지를 완성하였다.⁴ Soft PDMS/hard PDMS/FPCB 강성도 경사형 신축기판의 두께는 1.5 mm이었으며, 크기는 30 mm×70 mm이다. 패키지 형성에 사용된 soft PDMS, hard PDMS와 FPCB의 강성도는 각기 0.28 MPa, 1.74 MPa와 1.85 GPa이다.^{3,4} Hard PDMS/FPCB 기판에 플립칩 본딩한 Si 칩은 5 mm×5 mm 크기로, 직경 100 μm, 피치 600 μm인 범프 42개로 구성된 daisy chain 구조로 이루어져 있으며, 이전 논문에 기술한 방법을 따라 제작하였다.^{4,21,22}

Soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지의 인장변형 거동을 분석하기 위해, 신축 패키지를 6 mm/min의 변형률 속도로 30% 변형률까지 인장하면서 soft PDMS, hard

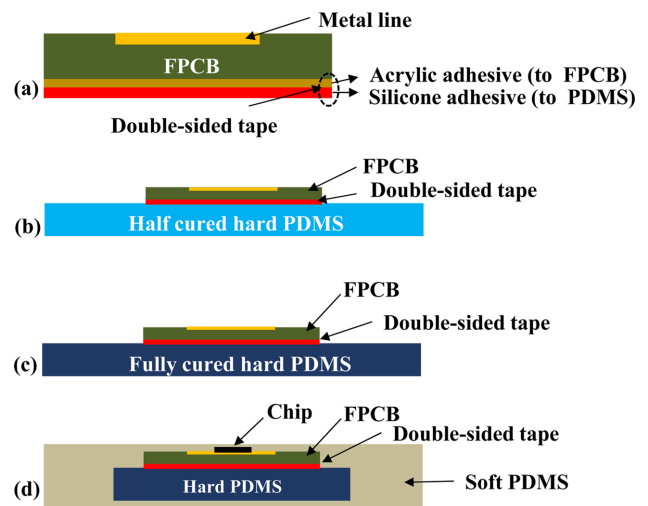


Fig. 2. Schematic illustration of the process flow for the stiffness-gradient stretchable package with the soft PDMS/hard PDMS/FPCB structure: (a) attach the acrylicsilicone double-sided tape to FPCB, (b) attach the FPCB to a partially cured hard PDMS using the silicone adhesive of the double-sided tape, (c) fully cure the hard PDMS and flip-chip bonding, and (d) pour and fully cure the soft PDMS after placing the flip-chip bonded hard PDMS/FPCB into a mold.

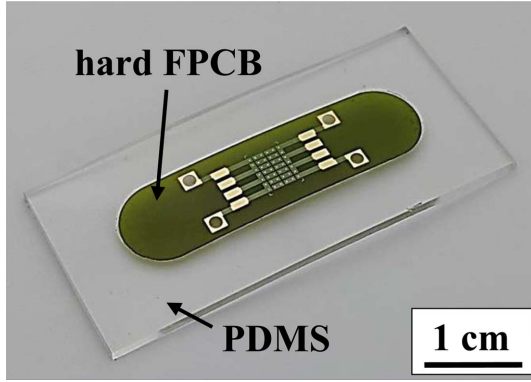


Fig. 3. Optical image of the hard PDMS/FPCB substrate.

PDMS와 FPCB 각 부위에서의 길이 변화를 측정하여 변형률을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

Soft PDMS/hard PDMS/FPCB 강성도 경사형 신축 패키지를 0~0.3 범위의 변형률로 인장하며 관찰한 사진들을

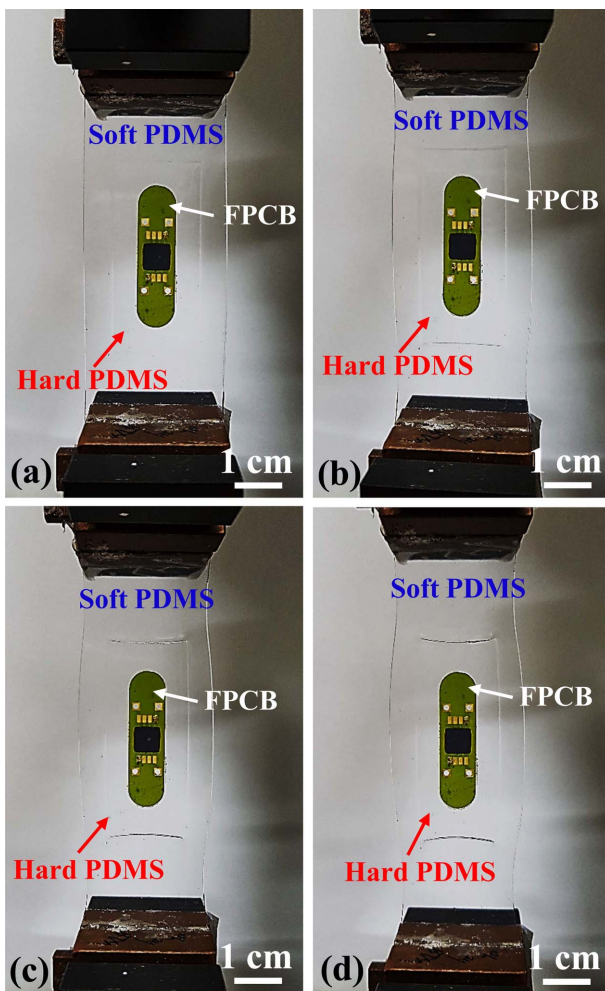


Fig. 4. Optical Images of the soft PDMS/hard PDMS/FPCB package elongated for a tensile strain of (a) 0, (b) 0.1, (c) 0.2, and (d) 0.3.

Fig. 4에 나타내었다.^{3,4)} 변형률 0.3에서도 soft PDMS와 hard PDMS 및 FPCB가 서로 잘 붙어 있으며, 신축변형이 강성도가 가장 낮은 soft PDMS 부위에서 주로 발생하는 것이 관찰되었다. Hard PDMS는 FPCB 위에 부착된 가운데 부분은 변형이 적게 발생하는 반면에 양 측면부는 상대적으로 조금 더 늘어나 그 위의 soft PDMS와의 계면이 오목한 형상을 나타내었다. Soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지에서 강성도가 서로 다른 soft PDMS, hard PDMS, FPCB 각 부위에서 측정된 변형률을 Fig. 5에 나타내었다.³⁾ 이때 hard PDMS의 변형률은 가운데 부분과 측면부에서 발생한 변형률의 평균값을 취하였다. Soft PDMS의 인장변형률이 0.1~0.3 범위일 때, hard PDMS의 변형률은 0.04~0.11로 soft PDMS에 비해 37~40% 정도 적게 변형되었으며, 강성도가 가장 높은 FPCB에서는 변형이 거의 발생하지 않았다. Soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지에서 FPCB의 변형거동은 PDMS와의 큰 강성도 차이에 기인하며 플립칩 실장된 Si 칩에 의한 영향이 없으므로, 이후 신축 패키지의 변형거동을 분석 시 Si 칩은 고려 대상에서 제외하였다.

Fig. 6과 같이 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지는 가장자리 부위인 I 부위, 중간 부위인 II 부위와, 중앙 부위인 III 부위로 구성되어 있다고 생각할 수 있다. 이들 I 부위, II 부위와 III 부위는 등응력(isostress) 조건을 만족한다. 가장자리 I 부위는 soft PDMS 만으로 이루어져 있으며, 중간 II 부위는 soft PDMS인 ② 부위, soft PDMS와 hard PDMS로 형성된 중간 강성도부 ③ 부위로 구성되어 있다. 중앙 III 부위는 soft PDMS인 ④ 부위, soft PDMS와 hard PDMS로 형성된 ⑤ 부위, 그리고 soft PDMS, hard PDMS와 FPCB로 형성된 island 역할을 하는 ⑥ 부위로 구성되어 있다. Fig. 7의 단면도와 같이 soft PDMS와 hard PDMS로 이루어진 중간 강성도부인 ③ 부

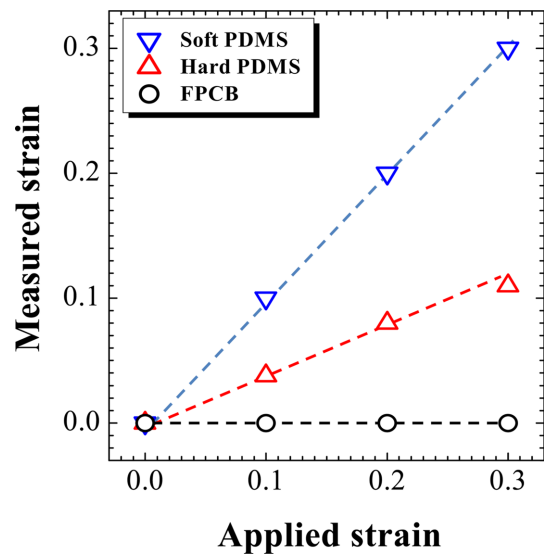


Fig. 5. Tensile strains measured for the soft PDMS, hard PDMS, and FPCB of the stiffness-gradient package substrate as a function of the applied tensile strain.

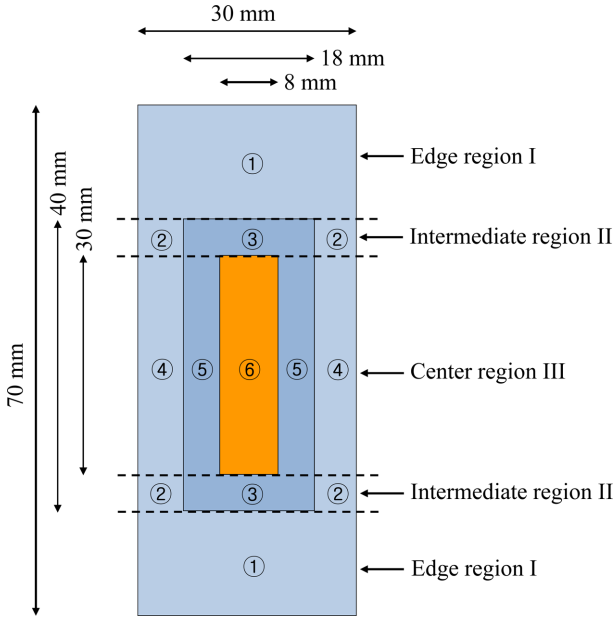


Fig. 6. Schematic illustration of the soft PDMS/hard PDMS/FPCB substrate consisting of the edge region *I*, intermediate region *II*, and center region *III*, which are in the isostress condition: ①, ②, and ④ are all soft PDMS, ③ and ⑤ are the area formed with two layers of soft PDMS and hard PDMS, and ⑥ is the island area formed with three layers of soft PDMS, hard PDMS, and FPCB.

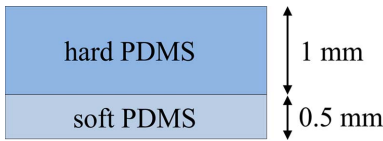


Fig. 7. Schematic cross-sectional illustration of the intermediate stiffness part consisting of the soft PDMS and hard PDMS.

위와 ⑤ 부위에서는 soft PDMS와 hard PDMS가 등변형률 (isostrain) 조건을 만족하므로 유효 탄성계수 $E_{gradient}$ 는 식 (1)을 사용하여 계산할 수 있다.^{5,6,25-27)}

$$E_{gradient} = E_{hard} V_{hard} + E_{soft} V_{soft} \quad (1)$$

식 (1)에서 E_{hard} 와 E_{soft} 는 각기 hard PDMS와 soft PDMS의 탄성계수이며, V_{hard} 와 V_{soft} 는 중간 강성도부를 구성하는 hard PDMS와 soft PDMS의 부피분율이다. $E_{hard} = 1.74$ MPa, $E_{soft} = 0.28$ MPa, $V_{hard} = 0.67$ 과 $V_{soft} = 0.33$ 을 식 (1)에 대입하여 중간 강성도부 ③과 ⑤ 부위의 유효 탄성계수 $E_{gradient} = 1.26$ MPa를 구하였다.

Fig. 8의 단면도와 같은 구조로 구성된 island 부인 ⑥ 부위에서도 soft PDMS, hard PDMS와 FPCB가 등변형률 조건하에 놓여 있으므로 island 부의 유효 탄성계수 E_{island} 는 식 (2)를 사용하여 구할 수 있다.^{5,6,25-27)}

$$E_{island} = E_{hard} V_{hard} + E_{soft} V_{soft} + E_{FPCB} V_{FPCB} \quad (2)$$

식 (2)에서 E_{hard} , E_{soft} , E_{FPCB} 는 각기 hard PDMS, soft PDMS, FPCB의 탄성계수이며, V_{hard} , V_{soft} , V_{FPCB} 는 hard

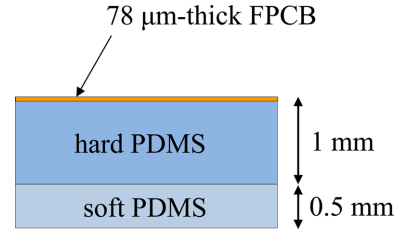


Fig. 8. Schematic cross-sectional illustration of the island part consisting of the soft PDMS, hard PDMS, and FPCB.

PDMS, soft PDMS, FPCB의 부피분율이다. $E_{hard} = 1.74$ MPa, $E_{soft} = 0.28$ MPa, $E_{FPCB} = 1.85$ GPa, $V_{hard} = 0.62$, $V_{soft} = 0.33$, $V_{FPCB} = 0.05$ 를 식 (2)에 대입하여 island 부위인 ⑥의 유효 탄성계수 $E_{island} = 93.7$ MPa를 구하였다.

Fig. 6에서 신축 패키지의 중간 *II* 부위는 soft PDMS 부 ②와 중간 강성도부 ③이 등변형률 조건인 Voigt 구조를 이루므로 유효 탄성계수 E_{II} 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.^{5,6,25-27)}

$$E_{II} = E_2 V_2 + E_3 V_3 \quad (3)$$

식 (3)에서 E_2 와 E_3 는 각기 ② 부위와 ③ 부위의 탄성계수이며, V_2 와 V_3 는 *II* 부위를 구성하는 ②와 ③의 부피분율이다. 식 (3)에 $E_2 = 0.28$ MPa, $E_3 = 1.26$ MPa, $V_2 = 0.4$, $V_3 = 0.6$ 을 대입하여 중간 부위 *II*의 유효 탄성계수 $E_{II} = 0.87$ MPa를 구하였다. Island 부위 ⑥이 있는 신축 패키지의 중앙부 *III*은 soft PDMS 부 ④와 중간 강성도부 ⑤, island 부 ⑥이 등변형률 조건을 이루므로 유효 탄성계수 E_{III} 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{III} = E_4 V_4 + E_5 V_5 + E_6 V_6 \quad (4)$$

식 (4)에서 E_4 , E_5 와 E_6 은 각기 ④, ⑤와 ⑥ 부위의 탄성계수이며, V_4 , V_5 와 V_6 은 중앙부 *III*을 구성하는 ④, ⑤, ⑥ 부위의 부피분율이다. $E_4 = 0.28$ MPa, $E_5 = 1.26$ MPa, $E_6 = 93.7$ MPa, $V_4 = 0.33$, $V_5 = 0.4$ 와 $V_6 = 0.27$ 을 대입하여 중앙부 *III*의 유효 탄성계수 $E_{III} = 25.9$ MPa를 구하였다.

Fig. 6에서 신축 패키지는 *I* 부위, *II* 부위와 *III* 부위가 등응력 조건인 Reuss 구조를 이루고 있으므로 유효 탄성계수 $E_{package}$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (5)에서 E_I 은 *I* 부위, 즉 soft PDMS의 탄성계수이며, V_I , V_{II} 와 V_{III} 는 각기 *I*, *II*, *III* 부위의 부피분율이다.^{5,6,25-27)}

$$\frac{1}{E_{package}} = \frac{V_I}{E_I} + \frac{V_{II}}{E_{II}} + \frac{V_{III}}{E_{III}} \quad (5)$$

식 (5)에 $E_I = 0.28$ MPa, $E_{II} = 0.87$ MPa, $E_{III} = 25.9$ MPa, $V_I = 0.43$, $V_{II} = 0.14$, $V_{III} = 0.43$ 을 대입하여서 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 구조의 강성도 경사형 신축 패키지의 유효 탄성계수 $E_{package}$ 로 0.58 MPa를 구하였다. 신축 패키지의 유효 탄성계수가 soft PDMS의 탄성계수보다 2배 정도 증가하였다.

Fig. 6와 같이 신축 패키지의 I 부위, II 부위, III 부위는 등응력 조건하에 놓여 있으므로 인장변형시 각 부위에서 발생하는 변형률의 크기는 각 부위의 유효 탄성계수에 반비례하게 된다.^{5,6,25-27)} $E_I = 0.28 \text{ MPa}$, $E_{II} = 0.87 \text{ MPa}$, $E_{III} = 25.9 \text{ MPa}$ 이므로, 각 부위에서 발생하는 변형률의 비는 식 (6)과 같아진다.

$$\varepsilon_I : \varepsilon_{II} : \varepsilon_{III} = \frac{1}{0.28} : \frac{1}{0.87} : \frac{1}{25.7} = 1 : 0.32 : 0.01 \quad (6)$$

실제 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지의 인장 시험시 II 부위에 있는 hard PDMS는 I 부위에 있는 soft PDMS에 비해 37~40% 정도 변형되며 III 부위에 있는 FPCB는 거의 변형되지 않았다는 Fig. 4와 Fig. 5의 결과는 식 (6)의 예측과 잘 일치하였다.

앞의 방법과는 다르게 Fig. 9와 같이 신축 패키지를 인장응력축에 평행하게 등변형률 조건을 만족하도록 가장자리 IV 부위, 중간 V 부위와 중앙 VI 부위로 나눌 수 있다. 가장자리 IV 부위는 soft PDMS 만으로 이루어졌으며, 중간 V 부위는 soft PDMS인 ②, soft PDMS와 hard PDMS로 형성된 중간 강성도부 ③으로 구성되어 있다. 중간 V 부위에서는 soft PDMS 부 ②와 중간 강성도부 ③이 등응력 조건인 Reuss 구조를 이루므로 유효 탄성계수 E_V 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.^{5,6,25-27)} 식 (7)에서 E_2 와 E_3 는 각기 ② 부위와 ③ 부위의 탄성계수이며, V_2 와 V_3 는 중간부위 V를 구성하는 ② 부위와 ③ 부위의 부피분율이다.

$$E_V = \frac{E_2 E_3}{E_2 V_3 + E_3 V_2} \quad (7)$$

Island 부 ⑥이 있는 중앙 VI 부위는 soft PDMS 부 ④와 중간 강성도부 ⑤, island 부 ⑥이 등응력 조건을 이루므로 유효 탄성계수 E_{VI} 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (8)에서 E_4 , E_5 와 E_6 은 각기 ④, ⑤와 ⑥ 부위의 탄성계수이며, V_4 , V_5 와 V_6 은 중앙부 VI를 구성하는 ④, ⑤, ⑥ 부위의 부피분율이다.

$$E_{VI} = \frac{E_4 E_5 E_6}{V_4 E_5 E_6 + V_5 E_4 E_6 + V_6 E_4 E_5} \quad (8)$$

신축 패키지는 Fig. 9와 같이 IV, V, VI 부위가 등변형률 조건인 Voigt 구조를 이루고 있으므로 유효 탄성계수 $E_{package}$ 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (9)에서 E_{IV} 은 IV 부위, 즉 soft PDMS의 탄성계수이며, V_{IV} , V_V , V_{VI} 는 IV, V, VI 부위의 부피분율이다.^{5,6,25-27)}

$$E_{package} = E_{IV} V_{IV} + \frac{E_2 E_3}{E_2 V_3 + E_3 V_2} V_V + \frac{E_4 E_5 E_6}{V_4 E_5 E_6 + V_5 E_4 E_6 + V_6 E_4 E_5} V_{VI} \quad (9)$$

식 (9)에 $E_{IV} = 0.28 \text{ MPa}$, $E_2 = 0.28 \text{ MPa}$, $E_3 = 1.26 \text{ MPa}$,

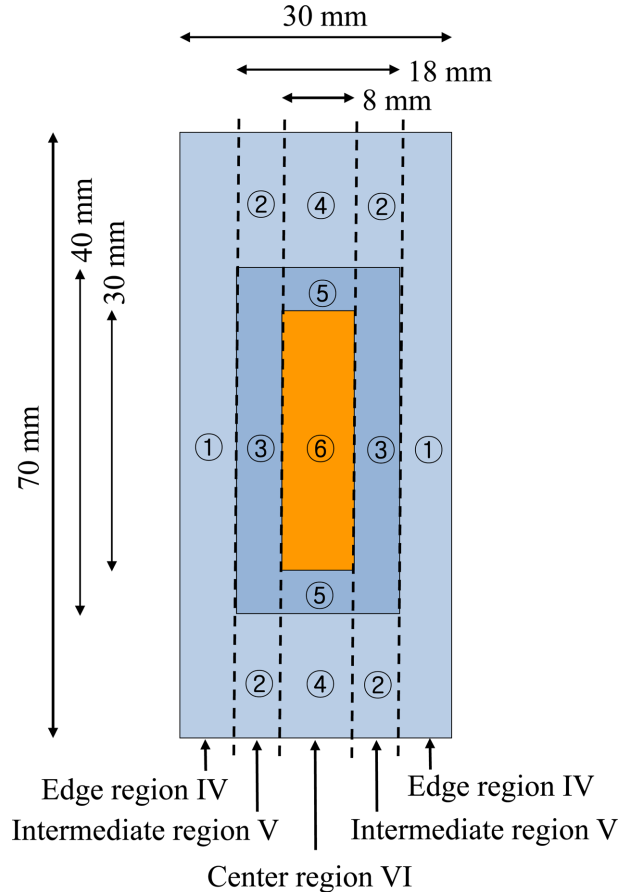


Fig. 9. Schematic illustration of the soft PDMS/hard PDMS/FPCB substrate consisting of the edge region IV, intermediate region V, and center region VI, which are in the isostrain condition: ①, ②, and ④ are all soft PDMS, ③ and ⑤ are the area formed with two layers of soft PDMS and hard PDMS, and ⑥ is the island area formed with three layers of soft PDMS, hard PDMS, and FPCB.

$E_4 = 0.28 \text{ MPa}$, $E_5 = 1.26 \text{ MPa}$, $E_6 = 93.7 \text{ MPa}$, $V_{IV} = 0.4$, $V_V = 0.33$, $V_{VI} = 0.27$, $V_2 = 0.43$, $V_3 = 0.57$, $V_4 = 0.43$, $V_5 = 0.14$, $V_6 = 0.43$ 을 대입하여서 구한 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지의 유효 탄성계수 $E_{package}$ 는 0.44 MPa로 앞에서 가장자리 I 부위, 중간 II 부위, 중앙 III 부위의 등응력 조건을 사용하여 구한 유효 탄성계수 0.58 MPa보다 낮은 값을 나타내었다.

Fig. 9와 같이 신축기판의 IV 부위, V 부위, VI 부위가 등변형률 조건으로 변형되면 각 부위에 인가되는 응력은 각 부위의 탄성계수에 비례하게 된다.^{5,6,25-27)} 식 (7)과 식 (8)을 사용하여 구한 V 부위와 VI 부위의 유효 탄성계수 E_V 와 E_{VI} 는 각기 0.5 MPa과 0.61 MPa 이므로, VI, V, VI 부위에 작용하는 응력비 $\sigma_{IV} : \sigma_V : \sigma_{VI} = 0.28 : 0.5 : 0.61 = 1 : 1.8 : 2.2$ 이 된다. 중간 V 부위의 soft PDMS ②와 중간 강성도부 ③은 서로 등응력 조건을 만족하며, 중앙 VI 부위의 soft PDMS ④, 중간 강성도부 ⑤와 island ⑥은 등응력 조건을 만족한다. 이와 같은 조건을 사용하면 가장자리 I 부위에서 soft PDMS의 변형률이 0.3일 때, 중간 V 부위에 있는 soft PDMS ②의 변형률은 0.54, hard PDMS ③

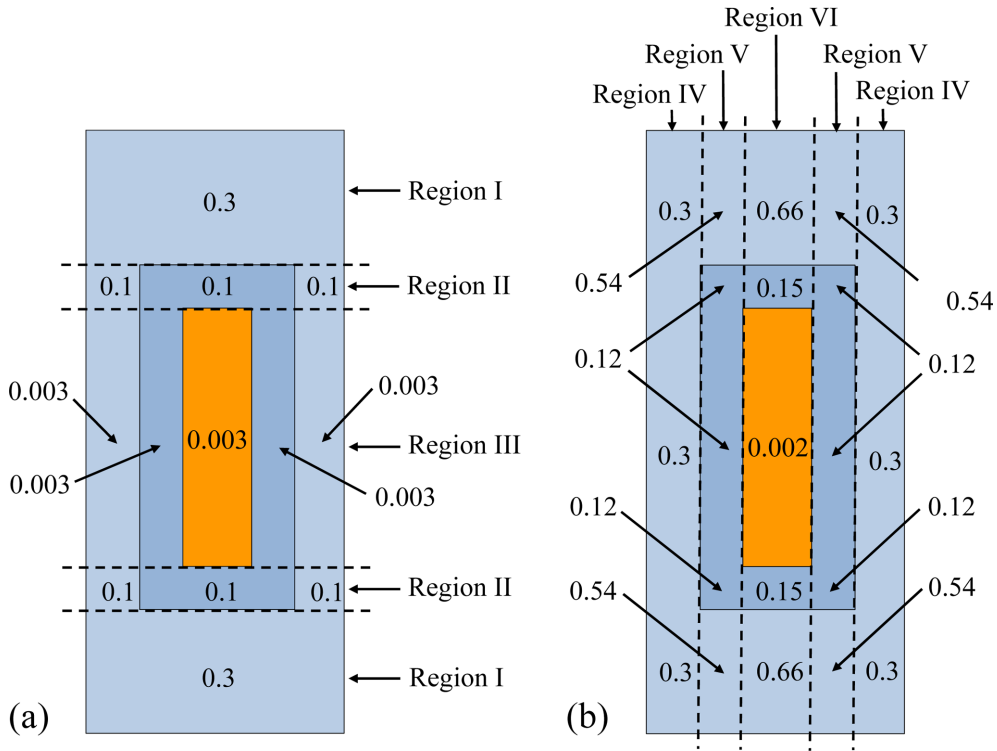


Fig. 10. Schematic illustration of the tensile strains analyzed at each part of the soft PDMS/hard PDMS/FPCB substrate with (a) the isostress condition among the edge region *I*, intermediate region *II*, and center region *III*, and (b) the isostrain condition of the edge region *IV*, intermediate region *V*, and center region *VI*.

의 변형률은 0.12가 된다. 또한 중앙 *VI* 부위에 있는 soft PDMS ④의 변형률은 0.66, hard PDMS ⑤의 변형률은 0.15이며, island 부 ⑥, 즉 FPCB의 변형률은 0.002로 거의 변형이 발생하지 않는 결과를 나타낸다.

Fig. 6과 같이 가장자리 *I* 부위, 중간 *II* 부위, 중앙 *III* 부위가 등응력 조건일 때와 Fig. 9와 같이 가장자리 *IV* 부위, 중간 *V* 부위, 중앙 *VI* 부위가 등변형률 조건일 때를 가정하고, 가장자리 *I* 또는 *IV* 부위에 있는 soft PDMS의 변형률이 0.3이 되도록 신축 패키지를 인장시 hard PDMS와 FPCB에서 발생하는 변형률을 구하여 Fig. 10에 비교하였다. Fig. 10(a)에서와 같이 *I* 부위, *II* 부위, *III* 부위가 등응력 조건일 때는 *II* 부위에서 hard PDMS 부와 접하고 있는 soft PDMS의 변형이 hard PDMS에 의한 제약에 의해 hard PDMS와 같은 정도로만 변형되었다. 중앙 *III* 부위에서는 FPCB 부와 접하고 있는 hard PDMS 및 또한 이에 접하고 있는 soft PDMS 부위의 변형이 강성도가 제일 높은 FPCB에 의한 제약으로 거의 발생하지 않는다는 것을 잘 보여주고 있다.

반면 Fig. 10(b)에서와 같이 *IV* 부위, *V* 부위, *VI* 부위가 등변형률 조건일 경우에는 *V* 부위와 *VI* 부위에 있는 soft PDMS의 변형률이 각기 0.54와 0.66으로 *IV* 부위에 있는 soft PDMS의 변형률 0.3에 비해 2배 정도 심하게 변형되는 것으로 분석되었다. *V* 부위와 *VI* 부위의 hard PDMS의 변형률도 0.12와 0.15로 서로 다르게 분석되었는데, 실제 신축 패키지에서는 이와 같은 변형거동을 보이기는 어

려울 것으로 판단되었다. 또한 *IV* 부위의 soft PDMS의 변형률을 보면 hard PDMS와 접하고 있지 않은 부분이나 접하고 있는 부분에서 모두 0.3의 동일한 변형률을 나타내는 것으로 분석되어 hard PDMS와의 본딩에 의한 제약이 고려되지 않은 결과를 나타내었다. 마찬가지로 *V* 부위에서도 hard PDMS의 변형률이 FPCB와 본딩 유무에 무관하게 0.12로 동일하게 분석되었다. 그러나 실제 변형 거동은 이와는 달리 hard PDMS와 접하고 있는 soft PDMS 부분에서는 hard PDMS에 의한 제약에 의해 변형이 억제되며, FPCB에 접하고 있는 hard PDMS의 변형 역시 FPCB에 의해 심하게 제약을 받게 된다. 따라서 Fig. 10(a)와 같이 가장자리 *I* 부위, 중간 *II* 부위, 중앙 *III* 부위를 등응력 조건으로 가정하고 구한 신축 패키지의 변형거동이 Fig. 10(b)와 같이 *IV* 부위, *V* 부위, *VI* 부위를 등변형률 조건으로 가정하고 분석한 변형거동보다 실제 변형거동에 더 가까울 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 강성도가 높은 FPCB를 island 기판으로 사용하고 강성도가 낮은 PDMS를 베이스 기판으로 사용한 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 구조의 강성도 경사형 신축 패키지의 유효 탄성계수와 변형거동을 등응력 조건과 등변형률 조건을 사용하여 분석하였다. 크기 30 mm×70 mm×1.5 mm이며 탄성계수가 0.28 MPa인 soft PDMS, 크

기 18 mm×40 mm×1 mm이며 탄성계수가 1.74 MPa인 hard PDMS와 크기 8 mm×30 mm×78 μm이며 탄성계수가 1.85 GPa인 FPCB를 조합하여 형성한 신축 패키지의 유효 탄성계수는 0.44~0.58 MPa로 분석되었다. 신축 패키지를 soft PDMS로만 구성되어 있는 가장자리 부, soft PDMS와 hard PDMS로 구성된 중간부, soft PDMS, hard PDMS와 FPCB로 이루어진 중앙부로 구분하여 신축 패키지의 변형거동을 분석시 가장자리 부, 중간부와 중앙부의 등응력 조건으로 분석한 변형거동이 등변형률 조건으로 분석한 결과보다 실제 변형거동에 훨씬 더 잘 부합하는 것으로 판단되었다. 신축 패키지의 가장자리 부, 중간부, 중앙부의 등응력 조건에서 가장자리 부의 soft PDMS가 0.3의 변형률로 인장될 때 hard PDMS의 변형률은 soft PDMS 변형률의 32%인 0.1, 그리고 FPCB의 변형률은 soft PDMS 변형률의 1%인 0.003으로 분석되었으며, 이는 실제 soft PDMS/hard PDMS/FPCB 신축 패키지를 인장시키며 각 부위에서 측정된 변형률과 잘 일치하였다. 이와 같은 변형거동을 바탕으로 soft PDMS/hard PDMS/PTFE 신축 패키지의 유효 탄성계수는 가장자리 부, 중간부와 중앙부의 등변형률 조건을 가정하고 구한 0.44 MPa보다는 등응력 조건을 가정하고 구한 0.58 MPa과 더 잘 일치할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환인 형태변형이 가능하고 신체 탈착이 편리한 착용형 디바이스 및 UI/UX 개발(과제번호: B0101-16-0420) 지원에 의해 수행되었으며, 일부는 홍익대학교 학술연구 진흥비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. S. Patel, H. Park, P. Bonato, L. Chan, and M. Rodgers, "A Review of Wearable Sensors and Systems with Application in Rehabilitation", *J. Neuroeng. Rehabil.* 9, 21 (2012).
2. M. Chan, D. Esteve, J.-Y. Fourniols, C. Escriba, and E. Campo, "Smart Wearable Systems: Current Status and Future Challenges", *Artif. Intell. Med.*, 56(3), 137 (2012).
3. D. Park, and T. S. Oh, "Interfacial Adhesion Enhancement Process of Local Stiffness-Variant Stretchable Substrates for Stretchable Electronic Packages", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(4), 111 (2018).
4. D. Park, and T. S. Oh, "Flip Chip Process on the Local Stiffness-Variant Stretchable Substrate for Stretchable Electronic Packages", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(4), 155 (2018).
5. H. A. Oh, D. Park, S. J. Shin, and T. S. Oh, "Deformation Behavior of Locally Stiffness-Variant Stretchable Substrates Consisting of the Island Structure", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(4), 117 (2015).
6. H. A. Oh, D. Park, K. S. Hahn, and T. S. Oh, "Elastic Modulus of Locally Stiffness-Variant Polydimethylsiloxane Substrates for Stretchable Electronic Packaging Applications", 22(4), 91 (2015).
7. J. Y. Choi, D. W. Park, and T. S. Oh, "Variation of Elastic Stiffness of Polydimethylsiloxane (PDMS) Stretchable Substrates for Wearable Packaging Applications", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(4), 125 (2014).
8. J. Y. Choi, and T. S. Oh, "Flip Chip Process on CNT-Ag Composite Pads for Stretchable Electronic Packaging", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(4), 17 (2013).
9. J. H. Ahn, H. Lee, and S. H. Choa, "Technology of Flexible Semiconductor/Memory Device", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(2), 1 (2013).
10. J. Xiao, A. Carlson, Z. J. Liu, Y. Huang, H. Jiang, and J. A. Rogers, "Stretchable and Compressible Thin Films of Stiff Materials on Compliant Wavy Substrates", *App. Phys. Lett.*, 93, 013109 (2008).
11. T. Sekitani, Y. Noguchi, K. Hata, T. Fukushima, T. Aida, and T. Someya, "A Rubberlike Stretchable Active Matrix Using Elastic Conductors", *Science*, 321, 1468 (2008).
12. D. H. Kim, J. H. Ahn, W. M. Choi, H. S. Kim, T. H. Kim, J. Song, Y. Y. Huang, Z. Liu, C. Lu, and J. A. Rogers, "Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits", *Science*, 320, 507 (2008).
13. J. H. Ahn, and J. H. Je, "Stretchable Electronics: Materials, Architectures and Integrations", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 45, 102001 (2012).
14. D. H. Kim, and J. A. Rogers, "Stretchable Electronics: Materials Strategies and Devices", *Adv. Mater.*, 20, 4887 (2008).
15. J. Y. Choi, D. H. Park, and T. S. Oh, "Chip Interconnection Process for Smart Fabrics Using Flip-Chip Bonding of SnBi Solder", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(3), 71 (2012).
16. S. W. Jung, J. S. Choi, J. B. Koo, C. W. Park, B. S. Na, J. Y. Oh, S. S. Lee, and H. Y. Chu, "Stretchable Organic Thin-Film Transistors Fabricated on Elastomer Substrates Using Polyimide Stiff-Island Structures", *ECS Solid State Lett.*, 4(1), P1 (2015).
17. Y. Y. Hsu, C. Papakyrikos, M. Raj, M. Dalal, P. Wei, X. Wang, G. Huppert, B. Morey, and R. Ghaffari, "Archipelago Platform for Skin-Mounted Wearable and Stretchable Electronics", *Proc. 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Lake Buena Vista, 145, IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society (CPMT) (2014).
18. R. Li, M. Li, Y. Su, Z. Song, and X. Ni, "An Analytical Mechanics Model for the island-bridge Structure of Stretchable Electronics", *Soft Matter*, 9, 8476 (2013).
19. Y. Y. Hsu, M. Gonzalez, F. Bossuyt, J. Vanfleteren, and I. D. Wolf, "Polyimide-Enhanced Stretchable Interconnects", *IEEE Trans. Electron Devices*, 58(8), 2680 (2011).
20. S. W. Jung, J. S. Choi, J. B. Koo, C. W. Park, B. S. Na, J. Y. Oh, S. S. Lee, and H. Y. Chu, "Stretchable Organic Thin-Film Transistors Fabricated on Elastomer Substrates Using Polyimide Stiff-Island Structures", *ECS Solid State Lett.*, 4(1), P1 (2015).
21. D. Park, and T. S. Oh, "Comparison of Flip-Chip Bonding Characteristics on Rigid, Flexible, and Stretchable Substrates: Part I. Flip-Chip Bonding on Rigid Substrates", *Mater. Trans.*, 58(8), 1212 (2017).
22. D. Park, K. S. Han, and T. S. Oh, Comparison of "Flip-Chip

- Bonding Characteristics on Rigid, Flexible, and Stretchable Substrates: Part II. Flip-Chip Bonding on Compliant Substrates”, *Mater. Trans.*, 58(8), 1217 (2017).
23. N. Lu, J. Yoon, and Z. Suo, “Delamination of Stiff Islands Patterned on Stretchable Substrates”, *Inter. J. Mater. Res.*, 98, 717 (2007).
24. D. W. Park, and T. S. Oh, “Stretchable Deformation-Resistance Characteristics of the Stiffness-Gradient Stretchable Electronic Packages Based on PDMS”, to be published in *J. Microelectron. Packag. Soc.* (2019).
25. C. R. Barrett, A. S. Tetelman, and W. D. Nix, “The Principles of Engineering Materials”, pp.316-325, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs (1973).
26. S. Popovics, “Quantitative Deformation Model for Two-Phase Composites Including Concrete”, *Mater. Struct.*, 20, 171 (1987).
27. S. Popovics, and M. R. A. Erdely, “Estimation of the Modulus of Elasticity of Concrete-like Composite Materials”, *Mater. Struct.*, 3, 253 (1970).