

섬(Island) 구조로 이루어진 강성도 국부변환 신축성 기판의 변형 거동

오현아 · 박동현 · 신수진 · 오태성[†]

홍익대학교 공과대학 신소재공학과

Deformation Behavior of Locally Stiffness-variant Stretchable Substrates Consisting of the Island Structure

Hyun-Ah Oh, Donghyeun Park, Soo Jin Shin and Tae Sung Oh[†]

Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea

(Received December 4, 2015; Corrected December 21, 2015; Accepted December 28, 2015)

초 록: 신축성 디바이스용 강성도 국부변환 기판기술을 개발하기 위해 강성도가 서로 다른 두 polydimethylsiloxane 탄성고분자를 사용하여 섬(island) 구조로 이루어진 강성도 국부변환 신축성 기판을 형성하고 변형 거동을 분석하였다. 기판 기지로는 탄성계수가 0.09 MPa인 Dragon Skin 10을 사용하였으며, 섬 구조의 강성도 국부변환부는 탄성계수가 2.15 MPa인 Sylgard 184를 사용하였다. 신축성 기판의 형상은 길이 6.5 cm, 두께 0.4 cm, 폭 2.5 cm 이었다. Dragon Skin 10 기지에 폭 1 cm, 길이 1~6 cm인 Sylgard 184의 삽입에 의해 신축성 기판의 탄성계수가 0.09 MPa에서 0.13~0.33 MPa로 증가하였다. 길이 4 cm, 폭 0.5~1.5 cm인 Sylgard 184 강성도 국부변환부를 내재시킴에 따라 신축성 기판의 탄성계수가 0.16~0.2 MPa로 증가하였으며, 길이 2 cm, 폭 0.5~1.5 cm인 강성도 국부변환부를 내재시킴에 따라 탄성계수가 0.142~0.154 MPa로 증가하였다. 신축성 기판의 변형률이 증가함에 따라 Sylgard 184와 Dragon Skin 10의 강도 차이가 현저히 증가하는데 기인하여 강성도 국부변환부의 변형억제 효과가 향상되었다.

Abstract: In order to develop stretchable substrate technology for stretchable devices, locally stiffness-variant stretchable substrates were processed with two polydimethylsiloxane elastomers of different stiffnesses and their deformation behavior was characterized. Low-stiffness substrate matrix and embedded high-stiffness island of the stretchable substrate were formed by using Dragon Skin 10 of the elastic modulus of 0.09 MPa and Sylgard 184 of the elastic modulus of 2.15 MPa, respectively. A stretchable substrate was fabricated to a configuration of 6.5 cm length, 0.4 cm thickness, and 2.5 cm width. The elastic modulus of a stretchable substrate was increased from 0.09 MPa to 0.13~0.33 MPa by embedding a Sylgard 184 island of 1 cm width and 1~6 cm length into the center part of the Dragon Skin 10 substrate matrix. The elastic modulus of a stretchable substrate was improved to 0.16~0.2 MPa by embedding a Sylgard 184 island of 4 cm length and 0.5~1.5 cm width and to 0.142~0.154 MPa by embedding a Sylgard 184 island of 2 cm length and 0.5~1.5 cm width. With increasing the tensile strain of a stretchable substrate, deformation restriction of the locally stiffness-variant Sylgard 184 island was further enhanced due to substantial increase in the strength difference between Sylgard 184 and Dragon 10 at large strain.

Keywords: Stretchable packaging, stretchable substrate, PDMS, stiffness, elastic modulus

1. 서 론

과학기술의 발전에 따라 전자 디바이스 기술도 변형자 유도가 전혀 없는 딱딱한 형상에서 두께, 크기와 무게를 줄이기 위한 노력을 경주하던 이전 제품으로부터 탈피하여 현재는 어느 정도 bending이 가능한 유연 제품들이 상용화 되고 있다. 미래의 전자 디바이스는 단순 유연 제품

을 넘어서 궁극적으로는 탄성변형이 가능하여 굽히고, 접고, 비틀고, 누르고, 잡아당기는 것과 같은 복잡한 신체 움직임에 순응한 심한 변형을 일으키면서도 안정된 동작이 가능한 신축성 제품으로 발전하고 있다.¹⁻¹³⁾ 신축성 디바이스로는 대면적 순응형 디스플레이(large-area conformable display), 전자 눈(electronic eyes)이나 벤딩 액츄에이터와 같이 삼차원 굴곡 전자소자, 신축성 LED, 신축

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

© 2015, 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.

성 태양전지, 삽입형 transient electronics, 헬스 모니터링 시스템, 인공 센싱피부(synthetic sensitive skins), 생의학 전극, 스마트 의류를 들 수 있다.¹⁻¹⁴⁾

신축성 디바이스를 구현하기 위해서는 신축성 기관, 신축성 회로배선과 신축성 전자부품들이 요구된다. 신축성 기관으로는 탄성변형력이 우수하고 인체에 무해하며 유전상수가 낮은 silicone 고분자인 polydimethylsiloxane (PDMS)이 일반적으로 사용되고 있다.^{1,4,15-17)} 신축성 회로배선으로는 전기비저항이 낮으며 내산화성이 우수하여 얇은 두께에서도 표면 산화에 의한 전기저항의 증가를 방지할 수 있는 Au 박막배선이 주로 사용되고 있다.¹⁵⁾ Au 박막을 신축성 회로배선으로 적용하기 위해, 신축성 기관에 인장 pre-strain을 준 상태에서 Au 박막배선을 형성한 후 신축성 기관의 pre-strain을 이완시켜 Au 박막에 압축응력을 인가함으로써 3차원 wavy 형상을 갖는 신축성 Au 박막배선을 구비하고 있다.¹⁵⁾

신축성 전자부품으로는 유기 전자소자들이나 삼차원 wavy 구조를 갖는 전자소자들에 대한 연구개발이 진행되고 있으나,¹⁸⁾ 모두 걸음마 단계에 있어 실제 신축성 디바이스에 적용하는 것이 현재로서는 불가능한 상태이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 PDMS와 같은 신축성 기관의 일부분에 강성도(stiffness)가 높은 고분자로 섬(island)들을 형성한 후 이들 섬 위에 전자부품들을 실장하고 이들 섬 사이를 신축성 배선으로 연결하는 그림 1과 같은 섬(island) 구조, 섬-교량(island-bridge) 구조 또는 군도(archipelago) 구조의 신축성 패키징 공정이 대안으로 제안되었다.^{2,18-21)} 이와 같은 섬 구조를 갖는 신축성 기관으로서 기관 기지는 강성도(stiffness)가 낮은 탄성고분자인 Dragon Skin 10을 사용하고, 이보다 강성도가 높은 탄성고분자인 Sylgard 184를 사용하여 강성도 국부변환부인 섬을 구성한 강성도 국부변환 PDMS 신축성 기관이 본 연구자들에 의해 제안되었다.²⁾

본 연구에서는 신축성 디바이스용 강성도 국부변환 기관기술을 개발하기 위한 기초연구로서 Dragon Skin 10과 Sylgard 184를 사용하여 강성도 국부변환 신축성 기관을 형성하고, Sylgard 184 강성도 국부변환부의 부피분율과 형상에 따른 신축성 기관의 변형 거동을 분석하였다.

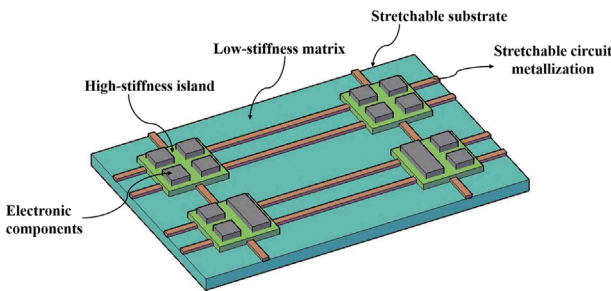


Fig. 1. Schematic illustration of a stretchable electronic packaging of islands structure.

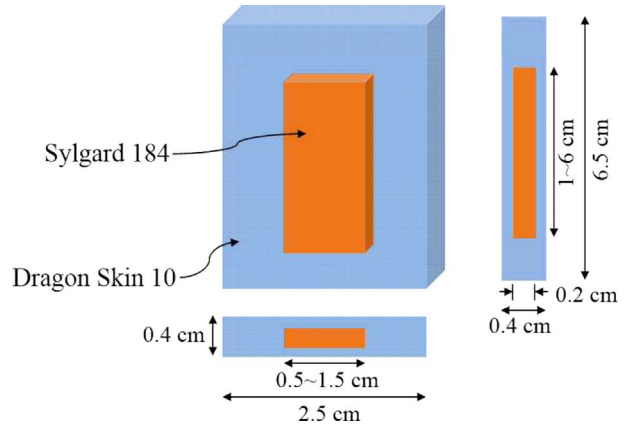


Fig. 2. Schematic illustration of a locally stiffness-variant stretchable substrate consisting of a high stiffness Sylgard 184 island embedded in a low stiffness Dragon Skin 10 matrix.

2. 실험 방법

본 실험에서는 강성도가 낮은 기관 기지(matrix)용 PDMS로는 Smooth-On 사의 상품명 Dragon Skin 10을 사용하였으며, 이보다 강성도가 높은 Sylgard 184(제조사: Dow Corning)를 사용하여 섬(island)에 해당하는 강성도 국부변환부를 형성하였다. 그림 2에 본 실험에서 사용한 강성도 국부변환 신축성 기관의 모식도를 나타내었다.²⁾

PDMS base와 curing agent의 혼합비 및 큐어링 온도에 따른 Sylgard 184와 Dragon Skin 10의 응력-변형률 곡선과 탄성계수는 본 연구자들의 이전 보고에서 찾을 수 있다.^{1,2)} 상기 이전 연구의 결과를 바탕으로 강성도 국부변환 신축성 기관을 구성하는 두 부분 중의 하나인 강성도가 높은 섬 구조인 강성도 국부변환부는 Sylgard 184를 base와 curing agent를 혼합비 10으로 섞어서 150°C에서 12시간 큐어링하여 형성하였으며, 신축성 기관의 다른 한 부분인 기관기지는 혼합비 1의 base와 curing agent에 10 wt%의 thinner를 섞은 후 상온에서 5시간 큐어링하여 형성하였다. 상기와 같은 조건으로 형성한 강성도 국부변환부용 Sylgard 184와 기관기지용 Dragon Skin 10의 탄성계수들은 각기 2.15 MPa과 0.09 MPa 이었다.²⁾

강성도 국부변환 신축성 기관의 공정순서도를 그림 3에 나타내었다.²⁾ PDMS base와 curing agent 혼합비 10으로 150°C에서 12시간 큐어링한 두께 0.2 cm인 Sylgard 184를 길이 1~5 cm, 폭 0.5~1.5 cm 크기로 절단하여 강성도 국부변환부를 형성하였다. 그림 3(a) 및 (b)와 같이 상기 Sylgard 184 강성도 국부변환부를 아크릴 몰드의 중앙부에 부착시킨 후, 그림 3(c)와 같이 Sylgard 184 주변에 소량의 Dragon Skin 10을 붓고 2시간 반경화 시켰다. 그림 3(d)와 같이 아크릴 몰드 내에 Dragon Skin 10을 주입하고 5시간 유지하여 경화시킨 후, 그림 3(e)와 같이 시편을 뒤집고 그 위에 다시 Dragon Skin 10을 주입한 후 5시간 유지하여 경화시키고, 아크릴 몰드에서 꺼내어 그림 3(f)와 같이 강성도 국부변환 신축성 기관을 완성하였다.

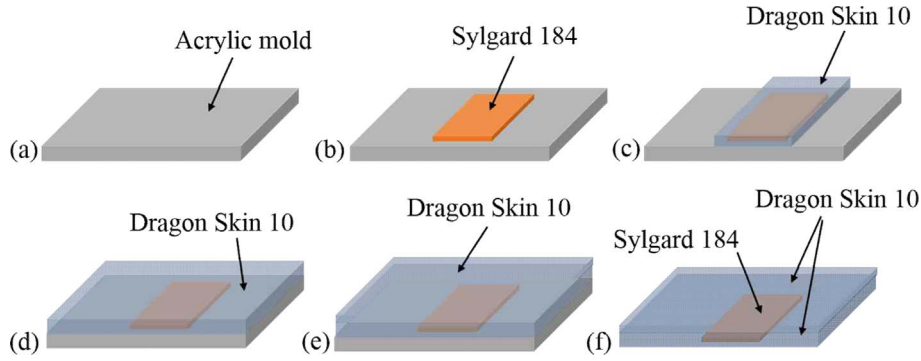


Fig. 3. Schematic illustration of the process flow for a locally stiffness-variant stretchable substrate: (a) acrylic mold, (b) attach a Sylgard 184 platform in an acrylic mold, (c) pour and half-cure a small amount of Dragon Skin 10 onto the Sylgard 184 platform, (d) charge and fully cure Dragon Skin 10, (e) flip the sample, charge and fully cure Dragon Skin onto it, (f) take out the completed sample from an acrylic mold.

강성도 국부변환 신축성 기판을 2.5 cm×11.5 cm 크기로 절단한 후 각 끝단에서 2.5 cm 되는 부위들을 인장시험기의 그립들에 물려 인장 부위의 초기길이가 6.5 cm가 되도록 한 후, 50 mm/min의 변형률 속도로 인장시험하여 공칭응력-공칭변형률 곡선을 측정하고 변형률 0~0.3 범위의 평균 기울기로 탄성계수를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4에 길이 4 cm, 폭 1 cm인 Sylgard 184 강성도 국부변환부 섬이 내재된 신축성 기판의 인장시험 전, 30% 인장 및 100% 인장되었을 때의 사진을 나타내었다. 그림 4(c)와 같이 100% 인장하여 사진을 찍은 시편들에는 각 부위에서 일어나는 변형 거동의 관찰이 용이하도록 인장 방향과 수직하게 시편에 선들을 그려두었다. 신축성 기판의 인장시 Sylgard 184 강성도 국부변환부가 삽입된 중앙부에 비해 강성도가 낮은 Dragon Skin 10으로만 구성된 가장자리부에서 주로 변형이 발생하는 것을 관찰할 수

있다. 특히 그림 4(c)에 있는 시편에 그려놓은 선의 변형 형상에서 명확히 관찰할 수 있는 것과 같이, 중앙부와 가장자리부의 경계에서 Sylgard 184에 근접할수록 인장 변형이 억제되는데 기인하여 인장시험전 경계부에 평행하게 그려놓았던 선이 100% 인장시 각도를 이루며 기울어져 있는 것을 관찰할 수 있다.

그림 5에 Sylgard 184 강성도 국부변환부의 폭을 1 cm로 고정하고 길이를 1~6 cm 범위에서 변화시킨 신축성 기판의 탄성계수를 Sylgard 184 강성도 국부변환부의 길이 및 부피분율의 함수로 나타내었다. Dragon Skin 10 기저로만 이루어진 신축성 기판은 0.09 MPa의 탄성계수를 나타내는데, 폭 1 cm, 길이 1~6 cm인 Sylgard 184의 삽입에 의해 신축성 기판의 탄성계수가 0.13~0.33 MPa로 증가하였다. 강성도가 높은 Sylgard 184가 강성도가 낮은 Dragon Skin 10에 삽입된 신축성 기판의 탄성계수는 상기 기판을 탄성계수가 서로 다른 두 재료들로 이루어진 복합재료로 가정하고 분석할 수 있다. 탄성계수가 서로 다른 두 재료로 구성된 복합재료에서 등변형률(isostrain) 조건하에 있는 Voigt 구조의 탄성계수는 식 (1)과 같이 표현되며, 등응력(isostress) 조건하에 있는 Reuss 구조의 탄성계수는 식 (2)와 같이 표현된다.^{2,22-24)} 식 (1)과 식 (2)에서 E_c 및 E_1 과 E_2 는 복합재료 및 이를 구성하는 재료 1과 재료 2의 탄성계수이며, V_1 과 V_2 는 각 재료의 부피분율이다.

$$E_c = E_1V_1 + E_2V_2 \tag{1}$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2} \tag{2}$$

강성도 국부변환 신축성 기판에서 강성도 국부변환부의 폭을 고정하고 길이를 변화시킬 경우, 그림 6(a)와 같이 Dragon Skin 10과 Sylgard 184로 이루어진 중앙부는 등응력 조건의 Reuss 구조를 이루게 되며, 이 중앙부가 Dragon Skin 10만 있는 가장자리부와 합쳐서 등변형률 조건의 Voigt 구조를 이루게 된다. 이를 스프링 모델로 나타

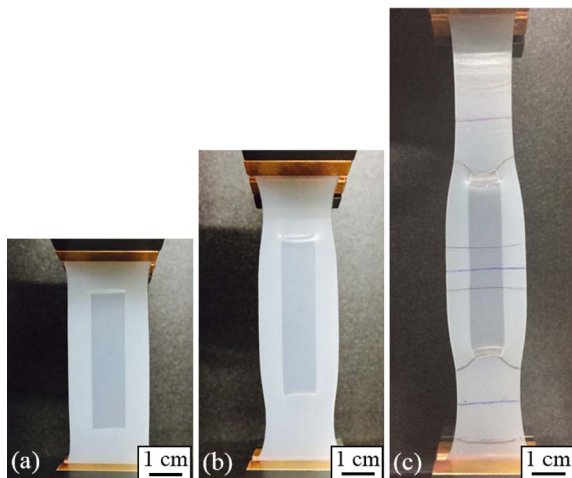


Fig. 4. Photographs of the locally stiffness-variant stretchable substrate (a) before tensile testing, (b) at a tensile strain of 0.3, and at a tensile strain of 1.

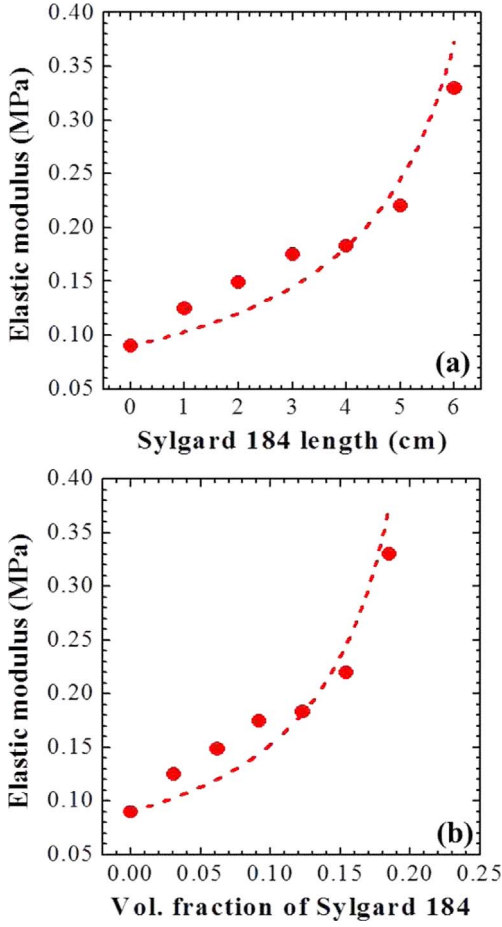


Fig. 5. Elastic modulus of a locally stiffness-variant stretchable substrate with a Sylgard 184 island of 1 cm width as a function of (a) the length and (b) volume fraction of a Sylgard 184 island. Dashed line indicates values estimated with Eq. (3).

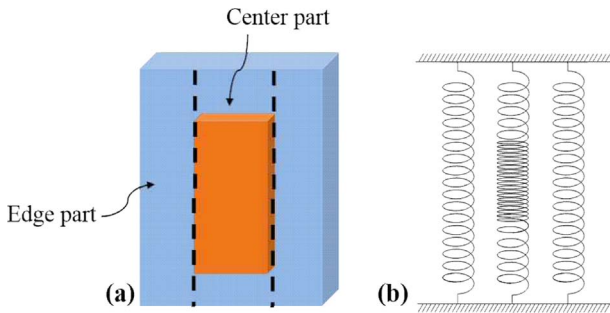


Fig. 6. (a) Schematic illustration of a locally stiffness-variant stretchable substrate used to obtain the results in Fig. 5 and (b) its equivalent spring model.

내면 그림 6(b)와 같이 표현할 수 있다. 이와 같은 경우 강성도 국부변환 신축성 기관의 탄성계수는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$E_{substrate} = \left(\frac{E_{syl}E_{DS}}{E_{syl}V_{syl(center)} + E_{DS}V_{DS(center)}} \right) V_{center} + E_{DS}V_{edge} \quad (3)$$

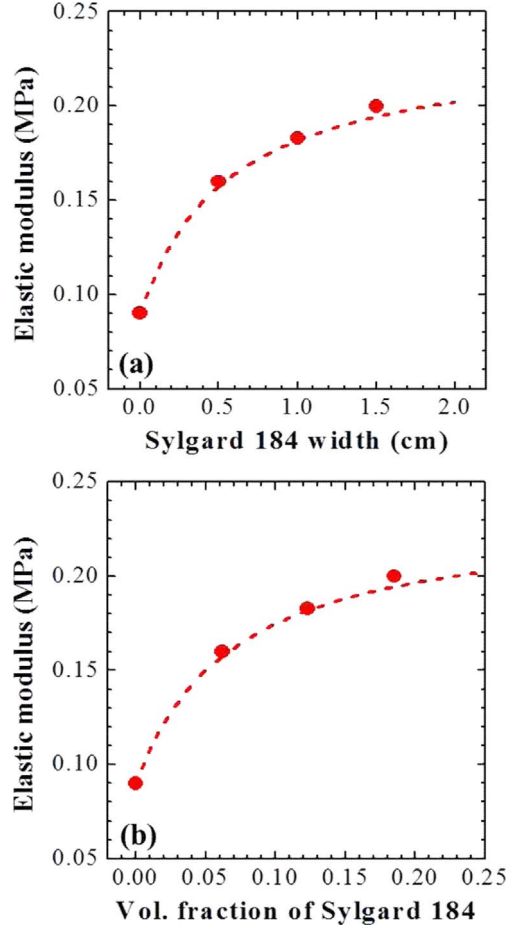


Fig. 7. Elastic modulus of a locally stiffness-variant stretchable substrate with a Sylgard 184 island of 4 cm length as a function of (a) the width and (b) volume fraction of a Sylgard 184 island. Dashed line indicates values estimated with Eq. (4).

식 (3)에서 $E_{substrate}$, E_{syl} 및 E_{DS} 는 각기 신축성 기관, Sylgard 184 및 Dragon Skin 10의 탄성계수이며, V_{center} 와 V_{edge} 는 신축성 기관을 구성하는 중앙부와 가장자리부의 부피분율이며, $V_{sul(center)}$ 와 $V_{DS(center)}$ 는 중앙부에서 Sylgard 184와 Dragon Skin 10이 차지하는 부피분율이다. $E_{syl} = 2.15 \text{ MPa}$, $E_{DS} = 0.09 \text{ MPa}$, $V_{center} = 0.4$, $V_{edge} = 0.6$ 및 $V_{sul(center)} = 0.154 \sim 0.923$ 과 $V_{DS(center)} = 0.007 \sim 0.846$ 을 식 (3)에 대입하여 구한 신축성 기관의 탄성계수 $E_{substrate}$ 는 그림 5에서와 같이 실제 측정값과 상당히 잘 일치하였다.

그림 7에 Sylgard 184 강성도 국부변환부의 길이를 4 cm로 고정하고 폭을 0.5~1.5 cm 범위에서 변화시킨 신축성 기관의 탄성계수를 Sylgard 184 강성도 국부변환부의 폭 및 부피분율의 함수로 나타내었다.²⁾ 또한 그림 8에는 Sylgard 184 강성도 국부변환부의 길이를 2 cm로 고정하고 폭을 0.5~1.5 cm 범위에서 변화시킨 신축성 기관의 탄성계수를 Sylgard 184의 폭 및 부피분율의 함수로 나타내었다. 그림 7과 그림 8의 실험과 같이 강성도 국부변환부의 길이를 고정하고 폭을 변화시킨 경우에는 그림 9(a)와 같이 Dragon Skin 10과 Sylgard 184로 이루어진 중앙부는

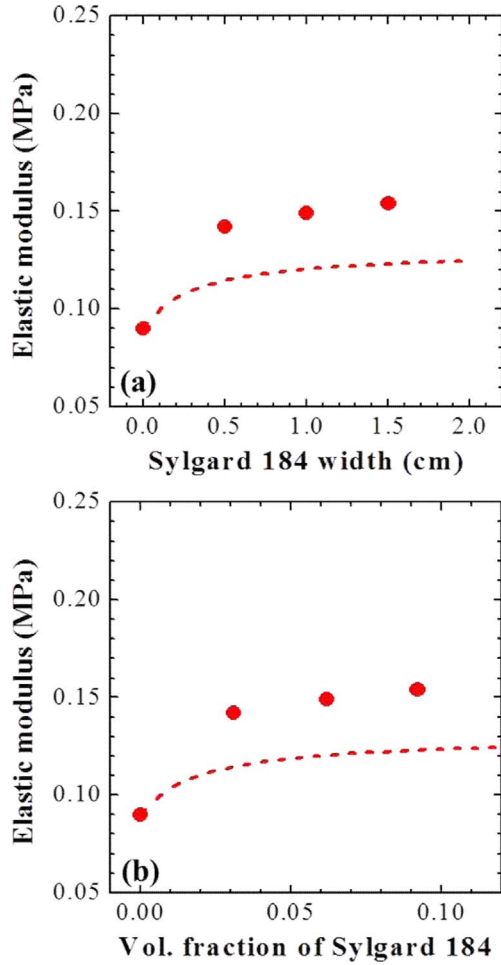


Fig. 8. Elastic modulus of a locally stiffness-variant stretchable substrate with a Sylgard 184 island of 2 cm length as a function of (a) the width and (b) volume fraction of a Sylgard 184 island. Dashed line indicates values estimated with Eq. (4).

등변형률 Voigt 구조를 이루고 이 중앙부와 Dragon Skin 10만 있는 가장자리부가 등응력의 Reuss 구조를 이루게 된다. 이를 스프링 모델로 나타내면 그림 9(b)와 같이 표현할 수 있다. 이때 강성도 국부변환 신축성 기판의 탄성계수는 식 (4)로 표현할 수 있다.²⁾

$$\frac{1}{E_{substrate}} = \frac{V_{center}}{E_{syl}V_{syl(center)} + E_{DS}V_{DS(center)}} + \frac{V_{edge}}{E_{DS}} \quad (4)$$

그림 7에서 $E_{syl} = 2.15$ MPa, $E_{DS} = 0.09$ MPa, $V_{center} = 0.615$, $V_{edge} = 0.385$ 및 $V_{sul(center)} = 0.1, 0.2, 0.3$ 과 $V_{DS(center)} = 0.9, 0.8, 0.7$ 을 식 (4)에 대입하여 구한 신축성 기판의 탄성계수 $E_{substrate}$ 는 실제 측정값과 매우 잘 일치하였다. 그러나 그림 8에서와 같이 신축성 기판의 탄성계수는 $E_{syl} = 2.15$ MPa, $E_{DS} = 0.09$ MPa, $V_{center} = 0.308$, $V_{edge} = 0.692$ 및 $V_{sul(center)} = 0.1, 0.2, 0.3$ 과 $V_{DS(center)} = 0.9, 0.8, 0.7$ 을 식 (4)에 대입하여 예측한 값보다 훨씬 높게 측정되었다. 강성도 국부변환부의 길이가 짧은 신축성 기판에서 탄성계수의 측정값이 예측값보다 높게 나오는 이유는 현재 불

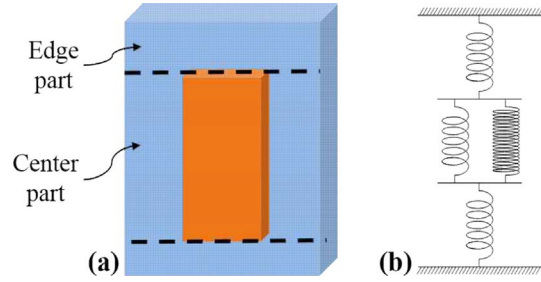


Fig. 9. (a) Schematic illustration of a locally stiffness-variant stretchable substrate used to obtain the results in Figs. 7 and 8 and (b) their equivalent spring model.

Table 1. Tensile strain of a locally stiffness-variant substrate and its Sylgard high-stiffness island of different width

Sylgard 184 Island		Tensile strain	
length (cm)	width (cm)	substrate	Sylgard 184 island
4	0.5	0.3	0.15
		1	0.25
	1.0	0.3	0.15
		1	0.213
	1.5	0.3	0.125
		1	0.175

명확한데, 그림 5에서도 강성도 국부변환부의 길이가 짧은 기판의 탄성계수가 식 3에 의한 예측값보다 더 높게 측정되었다.

표 1에 강성도 국부변환부의 길이를 4 cm로 고정하고 폭을 0.5~1.5 cm로 변화시킨 신축성 기판을 0.3과 1의 변형률로 인장시 강성도 국부변환부에서 발생한 인장변형률을 나타내었다. 강성도 국부변환부의 폭이 증가함에 따라 동일한 기판 변형률 하에서 발생하는 강성도 국부변환부의 변형률이 줄어들었다. 신축성 기판의 변형률이 0.3인 경우 강성도 국부변환부에서는 0.15~0.125의 변형률, 즉 기판 변형률의 50~42% 정도의 변형률이 발생하였

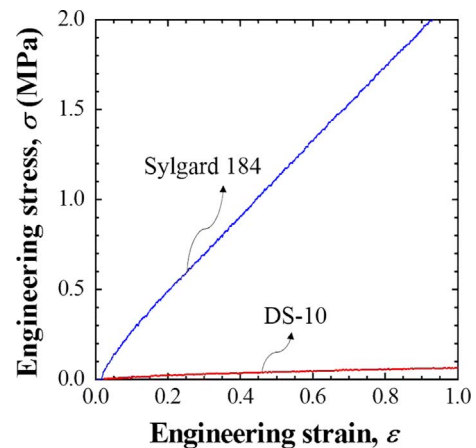


Fig. 10. Engineering stress-engineering strain (σ - ϵ) curves of the Sylgard 184 and Dragon Skin 10.

다. 기관 변형률을 1로 증가시킨 경우에는 강성도 국부변환부에서는 0.25~0.175의 변형률, 즉 기관 변형률의 25~17.5%의 변형률만 발생하였다. 이와 같이 신축성 기관의 변형률을 증가시키에 따라 강성도 국부변환부의 변형억제 효과가 향상되었는데, 이는 그림 10에서와 같이 변형률이 증가함에 따라 강성도 국부변환부로 사용한 Sylgard 184와 기관기소재로 사용한 Dragon Skin 10의 강도 차이가 현저히 증가하는데 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 신축성 디바이스용 강성도 국부변환 기관기술을 개발하기 위한 기초연구로서 Dragon Skin 10과 Sylgard 184를 사용하여 섬 구조로 이루어진 강성도 국부변환 신축성 기관을 형성하고, Sylgard 184 강성도 국부변환부의 부피분율과 형상에 따른 신축성 기관의 변형 거동을 분석하였다. 강성도 국부변환부용 Sylgard 184와 기관기지용 Dragon Skin 10의 탄성계수들은 각기 2.15 MPa와 0.09 MPa 이었다. Dragon Skin 10 기지에 폭 1 cm, 길이 1~6 cm인 Sylgard 184의 삽입에 의해 신축성 기관의 탄성계수가 0.09 MPa에서 0.13~0.33 MPa로 증가하였다. Dragon Skin 10 기지에 길이 4 cm, 폭 0.5~1.5 cm인 Sylgard 184 강성도 국부변환부를 내재시키에 따라 신축성 기관의 탄성계수가 0.09 MPa에서 0.16~0.2 MPa로 증가하였다. 길이 2 cm, 폭 0.5~1.5 cm인 Sylgard 184 강성도 국부변환부를 내재시킨 신축성 기관에서는 탄성계수가 0.09 MPa에서 0.142~0.154 MPa로 증가하였다. 강성도 국부변환 신축성 기관의 탄성계수 측정값은 등변형률 Voigt 구조와 등응력 Reuss 구조를 조합하여 예측한 탄성계수 값과 강성도 국부변환부의 길이가 짧은 경우를 제외하고는 비교적 잘 일치하였다. 신축성 기관의 변형률이 증가함에 따라 Sylgard 184와 Dragon Skin 10의 강도 차이가 현저히 증가하는데 기인하여 강성도 국부변환부의 변형억제 효과가 향상되었다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였습니다[14-82-11-004, 형태변형이 가능하고 신체 탈착이 편리한 착용형 디바이스 및 UI/UX 개발].

References

1. 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).
2. 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", to be published in *J. Microelectron. Packag. Soc.* (2015).
3. 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).
4. M. Gonzalez, B. Vandervelde, W. Chistianens, Y.-Y. Hsu, F. Iker, F. Bossuyt, J. Vanfleteren, O. van der Sluis and P. H. M. Timmermans, "Thermo-Mechanical Analysis of Flexible and Stretchable Systems", 11th International Conference of Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems (EuroSimE), Berlin, 1, Institute of Electrical and Electronics Engineers (2010).
5. J. H. Ahn, H. Lee and S. H. Choa, "Technology of Flexible Semiconductor/Memory Device", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(2), 1 (2013).
6. 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).
7. T. Löher, D. Manassis, R. Heinrich, B. Schmied, J. Vanfleteren, J. DeBaets, A. Ostmann and H. Reichl, "Stretchable Electronic Systems", Proc. 59th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, 893, IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society (CPMT) (2009).
8. 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).
9. 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).
10. M. Gonzalez, F. Axisa, M. V. Bulcke, D. Brosteaux, B. Vandervelde and J. Vanfleteren, "Design of Metal Interconnects for Stretchable Electronic Circuits", *Microelectron. Reliab.*, 48, 825 (2008).
11. T. Sekitani, H. Nakajima, H. Maeda, T. Fukushima, T. Aida, K. Hata and T. Someya, "Stretchable Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode Display Using Printable Elastic Conductors", *Nature Mater.*, 8, 494 (2009).
12. J. H. Ahn and J. H. Je, "Stretchable Electronics: Materials, Architectures and Integrations", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 45, 102001 (2012).
13. D. H. Kim and J. A. Rogers, "Stretchable Electronics: Materials Strategies and Devices", *Adv. Mater.*, 20, 4887 (2008).
14. 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).
15. S. P. Lacour, S. Wagner, Z. Huang and Z. Suo, "Stretchable Gold Conductors on Elastomeric Substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2404 (2003).
16. Y. K. Son, J. E. Kim and I. Y. Cho, "Trends on Wearable Computer Technology and Market", *Electronics and Telecommunications Trends*, 23, 79 (2008).
17. J. E. Kim, H. T. Jeong and I. Y. Cho, "Trend in Digital Clothing Technology", *Electronics and Telecommunications Trends*, 24, 20 (2009).
18. 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).
19. S. P. Lacour, S. Wagner, R. J. Narayan, T. Li and Z. Suo, “Stiff Subcritical Islands of Diamondlike Carbon for Stretchable Electronics”, *J. Appl. Phys.*, 100, 014913 (2006).
 20. Y. Y. Hsu, C. Papakyrikos, M. Raj, M. Dalal, P. Wei, X. Wang, G. Hupport, B. Morey and R. Ghaffari, “Archipelago Platform for Skin-mounted Wearable and Stretchable Electronics”, *Proc. 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Orlando, 145, IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society (CPMT), (2014).
 21. R. Li, M. Li, Y. Su, J. Song and X. Ni, “An Analytical Mechanics Model for the Island-Bridge Structure of Stretchable Electronics”, *Soft Matt.*, 9, 8476 (2013).
 22. C. R. Barrett, A. S. Tetelman and W. D. Nix, “The Principles of Engineering Materials”, pp.316-325, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs (1973).
 23. S. Popovics, “Quantitative Deformation Model for Two-phase Composites Including Concrete”, *Mater. Struct.*, 20, 171 (1987).
 24. S. Popovics and M. R. A. Erdey, “Estimation of the Modulus of Elasticity of Concrete-like Composite Materials”, *Mater. Struct.*, 3, 253 (1970).