

## 신축성 전자패키징용 강성도 국부변환 polydimethylsiloxane 기판의 탄성계수

오현아 · 박동현 · 한기선 · 오태성<sup>†</sup>

홍익대학교 공과대학 신소재공학과

### Elastic Modulus of Locally Stiffness-variant Polydimethylsiloxane Substrates for Stretchable Electronic Packaging Applications

Hyun-Ah Oh, Donghyeun Park, Kee-Sun Han and Tae Sung Oh<sup>†</sup>

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

(Received December 4, 2015; Corrected December 15, 2015; Accepted December 23, 2015)

**초 록:** 신축성 전자패키징에 응용하기 위해 강성도가 서로 다른 polydimethylsiloxane 탄성고분자인 Sylgard 184와 Dragon Skin 10을 사용하여 섬(island) 구조가 삽입된 강성도 국부변환 신축성 기판을 형성한 후, 강성도 국부변환부의 폭에 따른 기판의 탄성계수를 분석하였다. 기판 기지로는 탄성계수가 0.09 MPa인 Dragon Skin 10을 사용하였으며, 기판 기지 내에 삽입되는 강성도 국부변환부는 탄성계수가 2.15 MPa인 Sylgard 184로 형성하였다. 신축성 기판의 형상은 길이 6.5 cm, 두께 0.4 cm, 폭 2.5 cm이었으며, 중앙부에 길이 4 cm, 두께 0.2 cm, 폭 0.5~1.5 cm인 강성도 국부변환부를 삽입하였다. 폭 0.5 cm의 Sylgard 184를 Dragon Skin 10에 삽입함에 따라 기판의 탄성계수가 0.09 MPa에서 0.16 MPa로 증가하였다. Sylgard 184의 폭을 1.0 cm 및 1.5 cm으로 증가시킴에 따라 기판의 탄성계수가 0.18 MPa와 0.2 MPa로 증가하였으며, Sylgard 184 강성도 국부변환부의 폭에 따른 기판 탄성계수의 변화는 등변형률의 Voigt 구조와 등응력의 Reuss 구조를 조합하여 예측한 값과 잘 일치하였다.

**Abstract:** In order to apply to stretchable electronics packaging, locally stiffness-variant stretchable substrates consisting of island structure were fabricated by combining two polydimethylsiloxane elastomers of different stiffnesses and their elastic moduli were characterized as a function of the width of the high-stiffness island. The low-stiffness substrate matrix and the 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 be a configuration of 6.5-cm length, 0.4-cm thickness, and 2.5-cm width, in which a high-stiffness Sylgard 184 island, of 4-cm length, 0.2-cm thickness, and 0.5~1.5-cm width, was embedded. The elastic modulus of a stretchable substrate was increased from 0.09 MPa to 0.16 MPa by incorporating the Sylgard 184 island of 0.5-cm width to Dragon Skin 10 substrate matrix. The elastic modulus was further improved to 0.18 MPa and 0.2 MPa with increasing the Sylgard 184 island width to 1.0 cm and 1.5 cm, which were in good agreement with values estimated by combining the Voigt structure of isostrain and the Reuss structure of isostress.

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

## 1. 서 론

전자 디바이스의 기술개발 동향은 딱딱한 세라믹이나 PCB 기판에 딱딱하고 변형이 불가능한 전자부품들을 실장하여 형상 자유도가 전혀 없던 기존 제품들에서 어느 정도의 bending이 가능한 유연 제품을 거쳐 궁극적으로는 형상 자유도를 구현할 수 있도록 탄성변형이 가능한 신축성 제품으로 발전하고 있다.<sup>1-12)</sup>

신축성 디바이스로는 외형 디자인이 자유로운 대면적 순응형 디스플레이(large-area conformable display), 구형 기판에 focal plane 어레이가 구비되어 있는 전자 눈(electronic eyes), 벤딩 액츄에이터와 같이 삼차원 굴곡 표면을 갖는 전자소자, 신축성 LED, 신축성 태양전지, 삽입형 transient electronics, 헬스 모니터링 시스템, 인공 센싱 피부(synthetic sensitive skins), 생의학 전극, 스마트 의류가 있다.<sup>1-13)</sup> 신축성 전자 디바이스의 주요한 용도의 하나

<sup>†</sup>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.

로는 인체나 의복에 부착하여 굽히고, 접고, 비틀고, 누르고, 잡아당기는 것과 같은 복잡한 신체 움직임에 순응한 심한 변형을 일으키면서도 안정된 동작이 가능한 웨어러블 제품을 들 수 있다.<sup>14)</sup>

신축성 디바이스를 구현하기 위해서는 신축성 기관, 신축성 회로배선과 신축성 전자부품들이 요구된다. 신축성 기관으로는 탄성변형력이 우수하고 제조방법이 간단하며 인체에 무해하고 유전상수가 낮으며 유리전이온도  $T_g$ 가  $-125^\circ\text{C}$ 로 저온에서도 유연성이 유지될 수 있는<sup>15-17)</sup> polydimethylsiloxane (PDMS)이 일반적으로 사용되고 있다.<sup>1,3,18-20)</sup> Silicone 계열의 고분자인 PDMS는 backbone이 Si-O 결합으로 이루어져 있는데, Si-O 결합에너지는  $-622 \text{ kJ/mole}$ 로 일반적인 고분자의 C-C backbone 결합에너지인  $-100 \text{ kJ/mole}$ 에 비해 매우 낮기 때문에 일반 고분자에 비해 열과 화학반응에 대해 안정적인 특성을 갖고 있어,<sup>21)</sup> microfluidics용 microelectromechanical system (MEMS) 소자나 lab-on-a-chip 소자에 적용하기 위한 연구들도 활발히 이루어지고 있다.<sup>1,16,17)</sup>

신축성 회로배선으로는 재료 자체의 전기비저항이 낮으며 내산화성이 우수하여 몇십에서 몇백 nm의 얇은 두께로 증착하여도 표면 산화에 따른 전기저항의 증가를 방지할 수 있는 Au 박막배선이 주로 사용되고 있다.<sup>18)</sup> 그러나 다른 금속 박막과 마찬가지로 Au 박막도 1~1.5% 인장변형을 하에서 파단이 발생하기 때문에,<sup>14)</sup> 몇십% 이상의 인장변형률이 요구되는 신축성 디바이스의 신축성 회로배선으로 Au 박막을 그대로 적용하는 것은 어렵다. 이를 해결하기 위한 방안으로써, 신축성 기관에 몇십% 정도의 인장 pre-strain을 준 상태에서 Au 박막배선을 증착한 후 신축성 기관의 pre-strain을 이완시켜 Au 박막에 압축응력을 인가함으로써 3차원 wavy 형상을 갖게 하여 몇십%의 탄성 인장변형이 가능한 신축성 Au 박막배선을 구비하고 있다.<sup>18)</sup>

신축성 디바이스 구현의 핵심인자들 중에서 가장 개발이 더디며 어려운 인자가 신축성 전자부품이다. Si를 기반으로 한 기존의 반도체 소자들은 1% 정도의 인장변형률에 의해 파단되기 때문에 이를 대체하기 위한 신축성 전자부품으로서 유기 전자소자들이나 삼차원 wavy 구조를 갖는 전자소자들에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>14)</sup> 그러나 이들 연구들은 모두 개발의 걸음마 단계에 있어 실제 신축성 디바이스에 적용하는 것이 현재로서는 불가능한 상태이다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 PDMS와 같은 신축성 기관의 일부분에 강성도(stiffness)가 높아 변형이 억제될 수 있는 플랫폼(platform)을 형성한 후 이들 플랫폼에 기존 딱딱한 전자부품들을 실장하고 이들 플랫폼들 사이를 신축성 배선으로 연결하는 소위 섬(islands) 구조, 섬-교량(island-bridge) 구조 또는 군도(archipelago) 구조의 신축성 패키지들이 실현 가능한 대안으로 개발되고 있다.<sup>14,22-24)</sup> 이들 섬 구조, 섬-교량 구조 또는 군도 구조의

신축성 패키지를 구현하기 위해서는 PDMS 기관의 일부분에 플랫폼을 형성한 강성도 국부변환 기관의 신축변형 거동에 대한 이해가 필수적으로 요구된다.

강성도 국부변환 신축성 기관을 구현하기 위해서는 강성도가 낮은 기관 기지(matrix)와 이보다 강성도가 높은 플랫폼을 조합하여야 한다. 기존 연구들에서는 기관 기지로는 PDMS를 사용하고 플랫폼은 diamondlike carbon (DLC) 박막이나 폴리이미드 필름을 사용하여 구성하였다.<sup>14,22-24)</sup> 그러나 이와 같이 서로 완전히 다른 재료들을 사용하여 기관 기지와 플랫폼을 구성하면 신축성 기관의 인장변형시 기관 기지/플랫폼 계면에서 발생하는 전단응력에 의해 DLC 박막 플랫폼이 파단되거나 폴리이미드 플랫폼이 박리되는 문제점이 있을 수 있다. 이에 반해 기관 기지와 플랫폼을 모두 강성도가 서로 다른 PDMS들을 사용하여 구성하면 상기와 같은 기존 연구들의 문제점들을 회피할 수 있는 방안이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 신축성 디바이스용 강성도 국부변환 기관기술을 개발하기 위한 기초연구로서 기관 기지부와 강성도 국부변환부를 모두 PDMS를 사용하여 강성도 국부변환 신축성 기관을 형성하고 이의 탄성계수를 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 강성도가 낮은 기관 기지용 PDMS로는 Smooth-On 사의 상품명 Dragon Skin 10을 사용하였으며, 강성도가 높은 강성도 국부변환부 형성용 PDMS로는 Dow Corning사에서 시판하는 Sylgard 184를 사용하였다.

Backbone이 Si-O 결합으로 이루어져 있는 silicone 계열의 고분자인 PDMS는 교차결합의 정도를 변화시킴으로써 강성도를 변화시킬 수 있다.<sup>1)</sup> Dragon Skin 10은 Smooth-On사에서 A로 명명한 PDMS base와 B로 명명한 curing agent의 혼합비(base/curing agent)를 조절함으로써 강성도를 조절할 수 있으며, Sylgard 184 역시 액체상태로 제공되는 PDMS base와 curing agent의 혼합비를 변화시키거나 큐어링 온도를 변화시킴으로써 강성도를 조절할 수 있다.

강성도 국부변환부로 사용할 Sylgard 184의 PDMS base와 curing agent의 혼합비(base/curing agent)에 따른 강성도의 변화거동에 대한 연구 결과, base와 curing agent의 혼합비가 10일 때 가장 높은 탄성계수를 나타낸다고 보고되었다.<sup>1)</sup> 따라서 본 실험에서는 Sylgard 184의 탄성계수를 높일 수 있는 공정조건을 찾기 위해 PDMS base와 curing agent의 혼합비를 10으로 고정하고, 큐어링 온도를 변화시키며 탄성계수를 측정하였다. Sylgard 184의 PDMS base와 curing agent를 무게비가 10이 되도록 각기 칭량한 후 자전/공전형 슈퍼 믹서인 Thinky-Conditioning mixer (Phoenix Equipment Inc.)를 이용하여 2000 rpm에서 1분간 혼합하고 2000 rpm에서 2분간 defoaming 하였다.

혼합이 완료된 액상 Sylgard 184를 패트리 디쉬에 붓고 진공오븐 내에서 60°C~200°C의 온도에서 12시간 유지하여 경화시켰다.

경화가 완료된 Sylgard 184를 절단하여 1 cm×5 cm 크기의 막대 모양의 인장시험편들을 제조하였다. 길이 5 cm인 인장시험편의 각 끝단에서 1 cm 되는 부위에 인장시험기(Coretech JSV H1000)의 그립들을 물리고 50 mm/min의 변형률 속도로 인장시험하여 공칭응력(engineering stress)  $\sigma$ -공칭변형률(engineering strain)  $\epsilon$  곡선을 구하였다. 공칭응력-공칭변형률 곡선의 기울기로부터 탄성계수를 산출하였다.

Sylgard 184에 대해 큐어링 온도에 따른 탄성계수를 분석한 결과 200°C에서 큐어링시 탄성계수가 가장 높았으나 150°C에서 큐어링한 시편과 탄성계수의 차이가 크지 않으며(3. 결과 및 고찰 참조), 본 실험에 사용한 큐어링 오븐의 온도를 200°C로 일정히 유지하는 것이 어려워 강성도 국부변환 신축성 기관 형성용으로 Sylgard 184 강성도 국부변환부를 형성시에는 큐어링 온도를 150°C로 설정하였다.

기관 지지부로 사용할 Dragon Skin 10의 PDMS base와 curing agent의 혼합비를 1 (base : curing agent = 1 : 1)에서 6 (base : curing agent = 6 : 1)의 범위에서 변화시키며 무게비로 칭량한 후 1000 rpm에서 3분간 혼합하였다. 혼합이 완료된 Dragon Skin 10을 패트리 디쉬에 붓고 상온에서 5시간 유지하여 경화시켰다. 경화가 완료된 Dragon Skin 10을 절단하여 1 cm×5 cm 크기의 막대 모양의 인장 시험편들을 제조한 후, 50 mm/min의 변형률 속도로 인장 시험하여 탄성계수를 산출하였다. Dragon Skin 10의 PDMS base와 curing agent의 혼합비에 따른 탄성계수의 변화에 대한 분석 결과 혼합비 1의 조건에서 가장 낮은 탄성계수를 얻을 수 있었으며(3. 결과 및 고찰 참조), 이후 강성도 국부변환 신축성 기관의 매트릭스 부위를 형성시에는 혼합비 1의 조건을 사용하였다.

Dragon Skin 10 기관 지지부와 Sylgard 184 강성도 국부변환부를 조합한 그림 1과 같은 강성도 국부변환 신축성 기관의 공정순서도를 그림 2에 나타내었다. PDMS

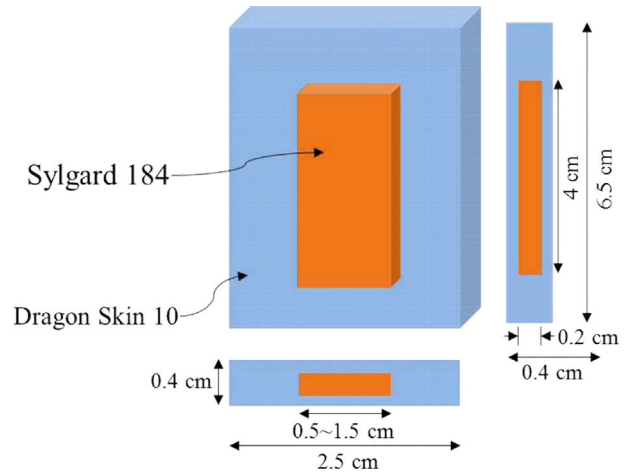


Fig. 1. Schematic illustration of a locally stiffness-variant stretchable substrate consisted of a high stiffness Sylgard 184 platform embedded in a low stiffness Dragon Skin 10 matrix.

base와 curing agent를 혼합비 10으로 섞은 후 150°C에서 큐어링한 Sylgard 184를 길이 4 cm, 폭 0.5 cm, 1.0 cm 및 1.5 cm 크기로 절단하여 강성도 국부변환부를 형성하였다. 그림 2(b)와 같이 상기 Sylgard 184 강성도 국부변환부를 아크릴 몰드의 중앙부에 부착시킨 후, 그림 2(c)와 같이 강성도 국부변환부의 주변에 소량의 Dragon Skin 10을 붓고 2시간 반경화 시켜 전체 Dragon Skin을 아크릴 몰드에 주입시 강성도 국부변환부가 움직이는 것을 방지하였다. 그런 다음 그림 2(d)와 같이 아크릴 몰드 내에 Dragon Skin을 주입하고 5시간 유지하여 경화시킨 후, 그림 2(e)와 같이 시편을 뒤집어서 아크릴 몰드에 장입하고 그 위에 다시 Dragon Skin을 주입한 후 5시간 유지하여 경화시키고 아크릴 몰드에서 꺼내어 그림 2(f)와 같이 Dragon Skin 10 기지 내에 Sylgard 184 강성도 국부변환부가 삽입되어 있는 강성도 국부변환 신축성 기관을 완성하였다.

강성도 국부변환 신축성 기관을 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

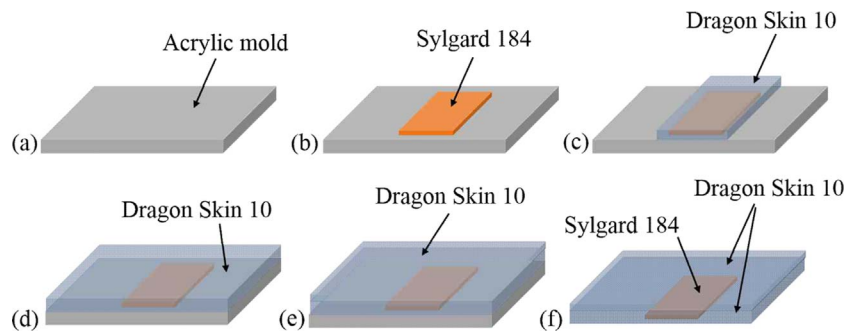


Fig. 2. Schematic illustration of the process flow for a locally stiffness-variant stretchable substrate: (a) acrylic mold, (b) attach a Sylgard 184 platform in an acrylic mold, (c) pour and half-cure a small amount of Dragon Skin 10 onto the Sylgard 184 platform, (d) charge and fully cure Dragon Skin 10, (e) flip the sample, charge and fully cure Dragon Skin onto it, (f) take out the completed sample from an acrylic mold.

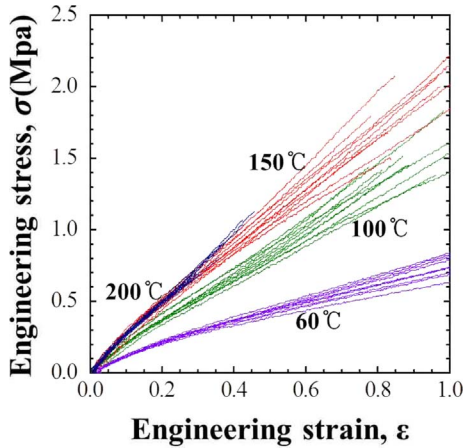


Fig. 3. Engineering stress-engineering strain ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curves of the Sylgard 184 cured at different curing temperatures.

되도록 한 후, 50 mm/min의 변형률 속도로 인장시험하여 공칭응력-공칭변형률 곡선을 측정하고 이의 기울기로부터 탄성계수를 산출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3에 큐어링 온도에 따른 Sylgard 184의 공칭응력-공칭변형률( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 곡선을 나타내었다. 큐어링 온도가 증가할수록 교차결합의 증가에 기인하여 Sylgard 184의 강도가 증가하는 반면 파단이 쉽게 발생하기 때문에 연신율이 감소하는 것을 알 수 있다. 큐어링 온도에 따른 Sylgard 184의  $\sigma$ - $\epsilon$  곡선의 기울기로부터 구한 탄성계수  $E$ 를 큐어링 온도의 함수로 그림 4에 나타내었다. PDMS의 응력-변형률 곡선은 0.4 이하의 공칭변형률  $\epsilon$ 에서 비교적 직선적이어서 탄성계수를 구하기 적합하다고 보고되고 있는 바,<sup>1,16,25)</sup> 본 연구에서는 공칭변형률 0~0.3 범위에서  $\sigma$ - $\epsilon$  곡선의 평균 기울기를 탄성계수로 구하였다. Sylgard 184의 탄성계수는 60°C에서 큐어링시 0.88 MPa를 나타내었으며, 큐어링 온도를 증가시킴에 따라 교차결합의 증가

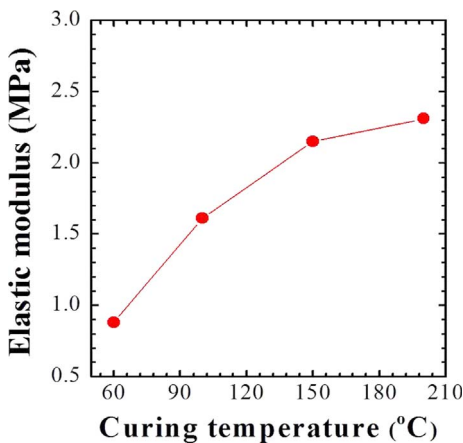


Fig. 4. Elastic modulus of the Sylgard 184 as a function of its curing temperature.

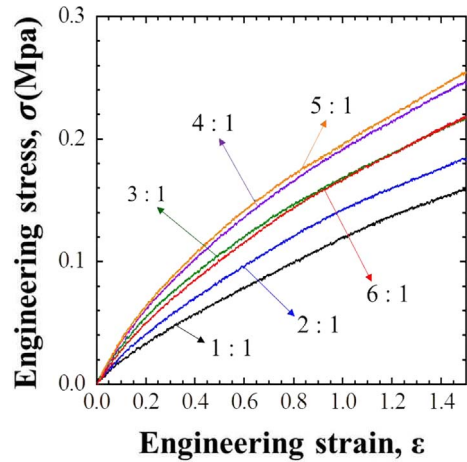


Fig. 5. Engineering stress-engineering strain ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curves of the Dragon Skin 10 formed with different mixing ratio of base : curing agent.

에 기인하여 150°C에서 큐어링시에는 2.15 MPa, 그리고 200°C에서 큐어링시에는 2.31 MPa의 탄성계수를 나타내었다. 그림 4에서와 같이 200°C에서 큐어링시 Sylgard 184의 탄성계수가 가장 높았으나 본 실험에서 사용한 큐어링 오븐의 온도를 200°C로 일정히 유지하는 것이 어려워 강성도 국부변환부용 Sylgard 184는 150°C에서 큐어링하여 사용하였다.

그림 5에 base : curing agent의 각 혼합비로 형성한 Dragon Skin 10의 대표적인 공칭응력-공칭변형률( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 곡선들을 나타내었다. 혼합비가 1에서 5까지 증가함에 따라 Dragon Skin 10의 강도가 증가하였으며, 혼합비를 5에서 6으로 더 증가시킴에 따라 강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 5에 있는  $\sigma$ - $\epsilon$  곡선들에 대해 공칭변형률 0~0.3 범위에서 구한 Dragon Skin 10의 탄성계수를 base : curing agent 혼합비의 함수로 그림 6(a)에 나타내었다. PMDS에서 base : curing agent 혼합비에 따른 탄성계수의 변화는 curing agent에 의한 교차결합의 정도에 의존한다.<sup>1,26-29)</sup> 따라서 Dragon Skin 10의 탄성계수에 미치는 교차결합의 영향을 보다 용이하게 파악하기 위하여 그림 6(b)에 curing agent의 무게분율에 따른 Dragon Skin 10의 탄성계수를 도시하였다. 그림 6(b)에서와 같이 curing agent의 무게분율을 0.143에서 0.177까지 증가시킴에 따라 Dragon Skin 10의 탄성계수가 0.21 MPa에서 0.26 MPa로 증가하였으며, 이는 교차결합의 증가에 기인한다. Curing agent의 무게분율이 0.177 이상으로 증가함에 따라 탄성계수가 감소하는데, 이는 Sylgard 184에서 보고된 것과 마찬가지로 PDMS base와 교차결합제 사이의 stoichiometry가 맞지 않아 PDMS base의 교차결합 site들을 포화시키고 남은 curing agent에 의해 기공이 형성되거나 고분자 네트워크가 희석되는데 기인한다.<sup>1,28,29)</sup>

그림 6의 결과를 바탕으로 Dragon Skin 10의 탄성계수가 가장 낮은 base : curing agent 혼합비 1을 강성도 국부 변환 신축성 기관의 기관 지지부의 형성조건으로 설정하

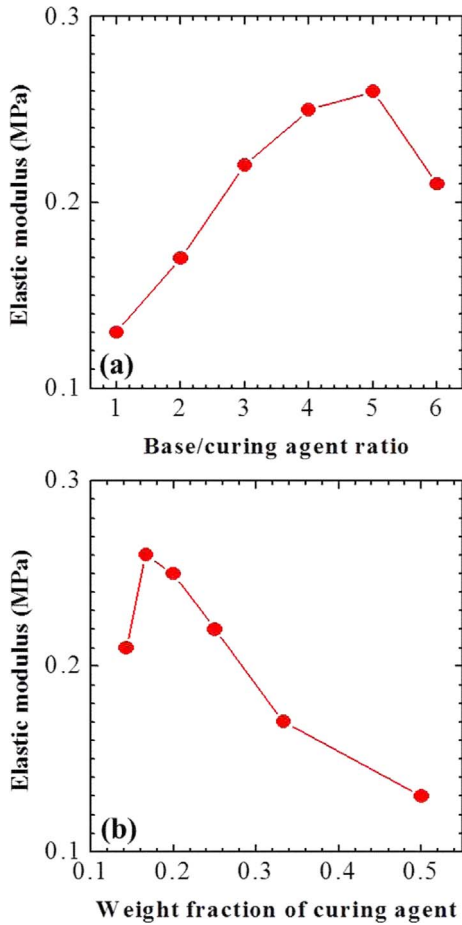


Fig. 6. Elastic modulus of the Dragon Skin 10, evaluated within the strain range of 0–0.3, as a function of (a) the base/curing agent mixing ratio and (b) the weight fraction of the curing agent.

였다. Dragon Skin 10의 pot life가 20분밖에 되지 않는데 반해 점성이 높아 기관 지지부를 형성하기 위해 고르게 퍼는데 시간이 많이 걸리는 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위해 Dragon Skin 10의 base와 curing agent를 1 : 1로 섞은 용액에 thinner를 10 wt% 첨가한 후 상온에서 5시간 경화시켜 Dragon Skin 10으로 이루어진 기관 지지부를 형성하였다. 그림 7에 10 wt% thinner 첨가 유무에 따른 Dragon Skin 10의  $\sigma$ - $\epsilon$  곡선을 비교하였다. Thinner 첨가에 의해 Si-O 고분자 네트워크의 밀도가 감소함에 따라 Dragon Skin 10의 강도가 저하하였으며, 공칭변형을 0~0.3 범위에서 구한 탄성계수는 0.13 MPa에서 0.09 MPa로 저하하였다.

그림 8에 Dragon Skin 10 기관 기지에 Sylgard 184 강성도 국부변환부를 내재하여 형성한 강성도 국부변환 신축성 기관의 인장시험 전후의 사진을 나타내었다. 상기 신축성 기관의 인장시 Sylgard 184 강성도 국부변환부가 삽입된 중앙부에 비해 강성도가 낮은 Dragon Skin 10으로만 구성된 가장자리부의 변형이 심하게 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

그림 9에 Sylgard 184 강성도 국부변환부의 폭이 0.5 cm

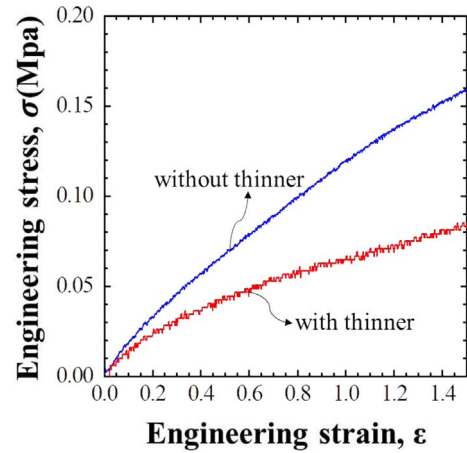


Fig. 7. Engineering stress-engineering strain ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curves of the Dragon Skin 10 processed with the base/curing agent mixing ratio of 1 without and with addition of 10 wt% thinner.

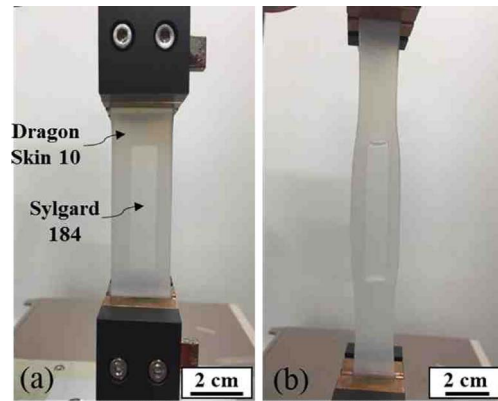


Fig. 8. Photographs of the locally stiffness-variant stretchable substrate (a) before and (b) at a tensile strain of 1.

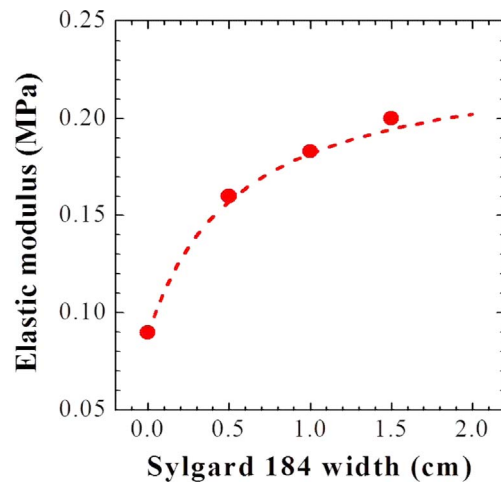


Fig. 9. Elastic modulus of the locally stiffness-variant stretchable substrate vs. the width of the high-stiffness Sylgard 184 island. Dashed line indicates values estimated with Eq. (3).

에서 1.5 cm로 증가하는데 따른 기관의 탄성계수를 나타내었다. Dragon Skin 10으로만 이루어진 기관은 0.09 MPa의 탄성계수를 나타내는데, 폭 0.5~1.5 cm, 길이 4 cm인



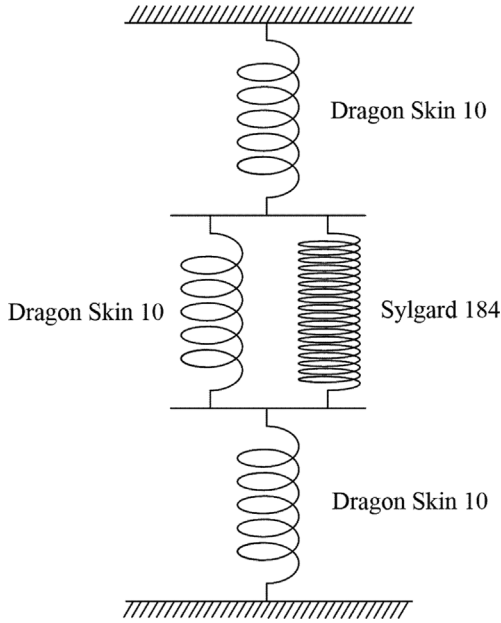


Fig. 10. Equivalent spring model of the locally stiffness-variant stretchable substrate for tensile loading.

Sylgard 184의 삽입에 의해 신축성 기관의 탄성계수가 0.16~0.2 MPa로 증가하였다. 본 연구에서와 같이 강성도 국부변환부가 삽입된 신축성 기관의 탄성계수는 상기 기관을 탄성계수가 서로 다른 Dragon Skin 10과 Sylgard 184를 조합하여 구성한 복합재료로 가정하고 분석할 수 있다. 탄성계수가 서로 다른 두가지 재료로 구성된 복합재료에서 등변형률(isostrain) 조건하에 있는 Voigt 복합재료의 탄성계수는 식 (1)과 같이 표현되며, 등응력(isostress) 조건하에 있는 Reuss 복합재료의 탄성계수는 식 (2)와 같이 표현된다.<sup>30-32)</sup> 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.

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

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

그림 1과 같은 강성도 국부변환 신축성 기관에서 Dragon Skin 10과 Sylgard 184로 이루어진 가운데 부분은 등변형률 조건의 Voigt 구조를 이루고 또한 이 가운데 부분이 Dragon Skin 10만 있는 가장자리 부위와 합쳐져서 등응력 조건의 Reuss 구조를 이루게 되며, 이를 스프링 모델로 나타내면 그림 10과 같이 표현할 수 있다. 이와 같은 사항을 고려하면 강성도 국부변환 신축성 기관의 탄성계수는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{E_{substrate}} = \frac{V_{center}}{E_{syl} V_{syl(center)} + E_{DS} V_{DS(center)}} + \frac{V_{edge}}{E_{DS}} \tag{3}$$

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,  $V_{syl(center)}$ 과  $V_{DS(center)}$ 는 중앙부에서 Sylgard 184와 Dragon Skin 10이 차지하는 부피분율이다.  $E_{syl} = 2.15$  MPa,  $E_{DS} = 0.09$  MPa,  $V_{center} = 0.615$ ,  $V_{edge} = 0.385$  및  $V_{syl(center)} = 0.1, 0.2, 0.3$ 과  $V_{DS(center)} = 0.9, 0.8, 0.7$ 을 식 3에 대입하여 구한 신축성 기관의 탄성계수  $E_{substrate}$ 는 그림 9에서와 같이 실제 측정값과 매우 잘 일치하였다.

그림 9의 결과에서와 같이 강성도가 높은 Sylgard 184를 강성도가 낮은 Dragon Skin 10에 삽입함에 따라 기관의 탄성계수가 0.09 MPa에서 0.16 MPa로 현저히 증가하였으나, Sylgard 184의 부피분율을 3배 증가시켜도 신축성 기관의 탄성계수의 변화가 크지 않았다. 이와 같은 이유는 강성도 국부변환 신축성 기관에서 강성도가 높은 중앙부와 강성도가 낮은 가장자리부가 등응력 조건의 Reuss 구조를 이루기 때문에 신축성 기관의 인장변형이 강성도가 낮은 가장자리부에서 집중적으로 발생하는 조화 평균(harmonic average) 특성에 기인한다.

#### 4. 결 론

신축성 패키지용 강성도 국부변환 기관기술을 개발하기 위한 기초연구로서 강성도가 낮은 기관 기지로는 Dragon Skin 10을 사용하고 강성도가 높은 강성도 국부변환부로는 Sylgard 184를 사용하여 신축성 기관을 형성한 후, 강성도 국부변환부의 분율에 따른 탄성계수를 분석하였다. 강성도 국부변환부로 사용할 Sylgard 184의 경우 PDMS base와 curing agent의 혼합비 10의 조건으로 혼합 후 60°C에서 큐어링시 탄성계수는 0.88 MPa이었으며, 큐어링 온도를 증가시키에 따라 교차결합의 증가에 기인하여 150°C에서 큐어링시에는 2.15 MPa의 탄성계수를 나타내었다. 기관 기지부로 사용할 Dragon Skin 10의 경우에는 base : curing agent의 혼합비가 1에서 5로 증가함에 따라 탄성계수가 0.13 MPa에서 0.26 MPa로 증가하여 최대값을 나타내었으며, 혼합비를 6으로 더 증가시키에 따라 탄성계수가 0.21 MPa로 감소하였다. Base : curing agent의 혼합비 1로 혼합한 Dragon Skin 10 용액의 점도를 낮추기 위해 10 wt% thinner를 첨가하여 큐어링시 고분자 네트워크의 밀도 감소에 기인하여 탄성계수가 0.13 MPa에서 0.09 MPa로 감소하였다. 탄성계수 2.15 MPa인 Sylgard 184로 두께 2 mm, 길이 4 cm이며 폭 0.5 cm인 강성도 국부변환부를 탄성계수 0.09 MPa인 Dragon Skin 10 기지부에 함침시켜 형성한 두께 4 mm, 길이 6.5 cm, 폭 2.5 cm의 강성도 국부변환 신축성 기관은 0.16 MPa의 탄성계수를 나타내었으며, 강성도 국부변환부의 폭을 1.0 cm 및 1.5 cm로 증가시키에 따라 기관의 탄성계수가 0.18 MPa 및 0.2 MPa로 증가하였다. 이와 같은 강성도 국부변환 신축성 기관의 탄성계수 측정값은 등변형률 조건의 Voigt 구조와 등응력 조건의 Reuss 구조를 조합하여 예측

한 탄성계수 값과 매우 잘 일치하였다.

## 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였습니다[14-82-11-004, 형태변형이 가능하고 신채 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. 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).
3. M. Gonzalez, B. Vanderveelde, 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", 11<sup>th</sup> 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).
4. J. H. Ahn, H. Lee and S. H. Choa, "Technology of Flexible Semiconductor/Memory Device", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(2), 1 (2013).
5. 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).
6. T. Löher, D. Manassis, R. Heinrich, B. Schmied, J. Vanfleteren, J. DeBaets, A. Ostmann and H. Reichl, "Stretchable Electronic Systems", Proc. 59<sup>th</sup> Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, 893, IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society (CPMT) (2009).
7. 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).
8. 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).
9. M. Gonzalez, F. Axisa, M. V. Bulcke, D. Brosteaux, B. Vanderveelde and J. Vanfleteren, "Design of Metal Interconnects for Stretchable Electronic Circuits", *Microelectron. Reliab.*, 48, 825 (2008).
10. 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).
11. J. H. Ahn and J. H. Je, "Stretchable Electronics: Materials, Architectures and Integrations", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 45, 102001 (2012).
12. D. H. Kim and J. A. Rogers, "Stretchable Electronics: Materials Strategies and Devices", *Adv. Mater.*, 20, 4887 (2008).
13. 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).
14. 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).
15. A. Befahy, P. Lipnik, T. Pardoen, C. Nascimento, B. Patris, P. Bertrand and S. Yunus, "Thickness and Elastic Modulus of Plasma Treated PDMS Silica-like Surface Layer", *Langmuir*, 26(5), 3372 (2010).
16. I. D. Johnston, D. K. McCluskey, C. K. L. Tan and M. C. Tracey, "Mechanical Characterization of Bulk Sylgard 184 for Microfluidics and Microengineering", *J. Micromech. Microeng.*, 24, 035017 (2014).
17. J. C. Lotters, W. Olthuis, P. H. Veltink and P. Bergveld, "The Mechanical Properties of the Rubber Elastic Polymer Polydimethylsilicone for Sensor Applications", *J. Micromech. Microeng.*, 7, 145 (1997).
18. S. P. Lacour, S. Wagner, Z. Huang and Z. Suo, "Stretchable Gold Conductors on Elastomeric Substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2404 (2003).
19. Y. K. Son, J. E. Kim and I. Y. Cho, "Trends on Wearable Computer Technology and Market", *Electronics and Telecommunications Trends*, 23, 79 (2008).
20. J. E. Kim, H. T. Jeong and I. Y. Cho, "Trend in Digital Clothing Technology", *Electronics and Telecommunications Trends*, 24, 20 (2009).
21. T. Linz, R. Vieroth, C. Dils, M. Koch, T. Braun, K. F. Becker, C. Kallmayer and S. M. Hong, "Embroidered Interconnections and Encapsulation for Electronics in Textiles for Wearable Electronics Applications", *Adv. Sci. Technol.*, 60, 85 (2008).
22. 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).
23. 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. 64<sup>th</sup> Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, 145, IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society (CPMT) (2014).
24. 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).
25. F. Schneider, T. Fellner, J. Wilde and U. Wallrabe, "Mechanical Properties of Silicones for MEMS", *J. Micromech. Microeng.*, 18, 065008 (2008).
26. T. K. Kim, J. K. Kim and O. C. Jeong, "Measurement of Non-linear Mechanical Properties of PDMS Elastomer", *Microelectron. Eng.*, 88, 1982 (2011).
27. E. A. Wilder, S. Guo, S. Lin-Gibson, M. J. Fasolka and C. M. Stafford, "Measuring the Modulus of Soft Polymer Network via a Buckling-Based Metrology", *Macromolecules*, 39, 4138 (2009).
28. Z. Wang, A. A. Volinsky and N. D. Gallant, "Crosslinking Effect on Polydimethylsiloxane Elastic Modulus Measured by Custom-Built Compression Instrument", *J. Appl. Polym. Sci.*,

- 131(22), (2014).
29. J. H. Seo, K. Sakai and N. Yui, "Adsorption State of Fibronectin on Poly(dimethylsiloxane) Surfaces with Varied Stiffness Can Dominate Adhesion Density of Fibroblasts", *Acta Biomater.*, 9, 5493 (2013).
30. C. R. Barrett, A. S. Tetelman and W. D. Nix, "The Principles of Engineering Materials", pp.316-325, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs (1973).
31. S. Popovics, "Quantitative Deformation Model for Two-phase Composites Including Concrete", *Mater. Struct.*, 20, 171 (1987).
32. S. Popovics and M. R. A. Erdey, "Estimation of the Modulus of Elasticity of Concrete-like Composite Materials", *Mater. Struct.*, 3, 253 (1970).