특 집

고-종횡비 Wrinkle 패턴의 형성과 응용

고태준 · 문명운 · 오규환 · 이광렬

1. 서론

Wrinkle(주름)이란 단어를 들으면 사람들은 피부의 노화로 인하여 생기는 wrinkle을 가장 먼저 떠올릴 것이다. 몸무게의 16%에 이를 정도로 큰 비중을 차지하고 있는 피부는 일반적으로 3층으로 구분된다. 피부는 가장 안쪽의 피하지방으로 시작하여 두꺼운 진피층 위에 외부 환경과 직접적인 접촉을 하는 얇은 표피층이 가장 바깥쪽에 위치한 구조로 되어있다. 피부는 노화가 진행됨에 따라 약 30% 정도의 탄성 계수(0.2~3 MPa)의 상승이 피부의 탄력을 떨어뜨리게 되어 wrinkle의 형성을 유발한다.[1,2] 하지만 이러한 wrinkle 패턴은 우리 몸에서 피부에만 있는 것이 아니고, 뇌, 심장벽, 혈관 등의 내장 기관에서도 다수 살펴볼 수 있다. Wrinkle 패턴의 형성은 비단 신체에 관한 분야에서만 화제가 되는 것이 아니다. 박막이 기판 위에 있는 구조의 경우 외력 등에 기인한 기계적 불균형에 의해 발생하는 균열(cracking), 좌굴(buckling), 주름(wrinkling) 등의 현상은 박막 관련 산업 분야에서도 해결해야 하는 문제 중의 하나로 여겨져 왔다.[3-6] **그림 1**에 보이는 것처럼 압축응력을 받는 박막이 상대적으로 단단한 물질(Si, 유리, 금속 등) 위에 코팅이 되고, 압축응력에 의한 박막의 탄성 변형 에너지가 계면 접합 에너지에 비해서 크게 되면 박막이 기판에서 떨어지는 박리 좌굴 현상(delamination buckling)이 발생하게 된다. 하지만 압축 응력을 받는 박막이 유연 기판 혹은 연질(soft) 기판에 접합되어 있는 경우, 박막과 함께 기판의 변형이 가능하기 때문에 기판의 변형을 통해서도 탄성 변형 에너지를 소모하게 되며, 이 과정에서 wrinkle 패턴이 형성되게 된다. 그러나 최근 들어 이러한 통념은 wrinkle 구조의 패턴을 조절하는 기술의 발전과 함께 형성된 wrinkle 구조를 이용한 다양한 응용분야가 개척됨에 따라 긍정적인 방향으로 바뀌고 있다.[7-10] 특히 wrinkle 구조는 세포 주형(cell template)과 단백질 응축(protein condensation)을 위한 나노채널(nanochannel)의 제작에서부터 스마트 접착면(smart adhesive)과 광학 격자 소자(optical grating device)의 제작에도 활용될 정도로 넓은 활용분야를 인정받으며, 그 형성 및 응용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[11-14]

고태준

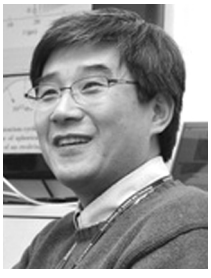
2008 서울대학교 재료공학부(학사)
2010 서울대학교 재료공학부(석사)
2010~현재 서울대학교 재료공학부(박사과정)
한국과학기술연구원 미래융합연구본부 계산과학연구센터

문명운

1998 서울대학교 재료공학부(학사)
2000 서울대학교 재료공학부(석사)
2004 서울대학교 재료공학부(박사)
2005~2007 미국 Harvard University 박사후 연구원
2008~현재 한국과학기술연구원 미래융합연구본부 계산과학연구센터 선임연구원

오규환

1980 서울대학교 금속공학과(학사)
1983 서울대학교 금속공학과(석사)
1986 서울대학교 금속공학과(박사)
1990~1991 영국 Oxford University 박사후 연구원
1997~현재 서울대학교 재료공학부 교수



이광렬

1984 서울대학교 금속공학과(학사)
1988 한국과학기술원 금속공학과(박사)
1988~1991 미국 Harvard University 박사후 연구원
1991~현재 한국과학기술연구원 미래융합연구본부 계산과학연구센터 책임연구원

Formation of High Aspect Ratio Wrinkles and Its Application

서울대학교 공과대학 재료공학부(Tae-Jun Ko and Kyu Hwan Oh, School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, 599 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea)
한국과학기술연구원 미래융합기술연구본부(Tae-Jun Ko, Myoung-Woon Moon, and Kwang-Ryeol Lee, Future Fusion Research Division, Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea) e-mail: mwmoon@kist.re.kr

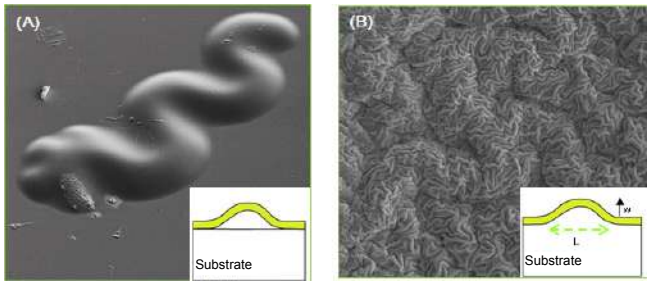


그림 1. 박막과 기판 사이의 기계적 불균형에 의해 발생하는 박리 좌굴(delamination buckling)과 주름(wrinkling).

Wrinkle 패턴의 제작기술은 연성 기판과 단단한 박막 사이에 발생하는 변형률과 탄성계수의 차이를 이용하는 방향으로 발전되어 왔는데, 이때 형성되는 wrinkle 구조의 형상은 기판과 박막의 물성에 의해 결정되게 된다. **그림 1**의 wrinkle 이미지(오른쪽)에 나타난 것처럼 wrinkle은 형상을 이루고 있는 주기(wavelength, L)와 높이(amplitude, W)로 정의하게 된다. 우선 wrinkle 구조의 주기는 박막의 두께와 박막과 기판의 강성도 비율에 따라 결정되며, wrinkle 구조의 높이는 가해지는 응력과 박막과 기판에 야기된 변형률의 비율에 의해 결정된다. 이때 wrinkle 구조의 높이와 주기의 비율을 wrinkle의 종횡비라 하며, 이는 wrinkle 구조의 특성을 결정하는 주요한 인자가 된다. 형성된 wrinkle 구조의 종횡비는 박막과 기판의 기계적 물성의 상관관계에 의해 약 1/10으로 제한되는데, 이를 극복하기 위한 새로운 개념의 wrinkle 구조 형성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 특집에서는 wrinkle 구조의 형성기구와 wrinkle 구조의 응용분야에 대한 소개를 거쳐 고-종횡비 wrinkle 구조를 제작하기 위한 새로운 개념의 wrinkle 형성 방법을 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 Wrinkle 구조의 생성 방법

2.1.1 박막/기판의 변형을 통한 Wrinkle 형성 방법

피부에 나타나는 wrinkle은 자연계에서 관찰되는 가장 흔한 wrinkle 구조 중 한 예이며, 자연계에는 작게는 수 나노미터 크기의 탄소나노튜브나, 마이크로 단위의 세포, 크게는 수 킬로미터에 이르는 산맥까지 다양한 wrinkle 구조가 존재한다.[15-18] Wrinkle 구조의 다른 예로 말린 사과나 건포도와 같은 수분을 건조시킨 과일이 있는데, 이 역시 단단한 껍질에 쌓여진 말랑한 과실이 수분이 줄어듦에 따라 부피가 감소하여 껍질에 wrinkle 구조의 형성을 야기하는 원리에 의해 형성된다. 박막의 관점에서도 마찬가지로 **그림 2**와 같이 열에 의한 변형이나 외력에 의해서 기판이 면방향의 압축응력을 받을 때 발생하기 쉽다. 열에 의한 wrinkle 형성은 박막과 기판 사이의 열팽창계수의 차이에 의해서 가능한데, 기판으로 사용하는 고분자의 열팽창계수가 금속 등의 박막의 열팽창계수에 비해서 현저히 높기 때문에 wrinkle이 형성될 수 있다. 이에 반해 외력에 의해서 형성되는 wrinkle 패턴은 기판을 인장하여 stretching한 후, 박막을 증착하고, 기판의 인장을 되돌리게 되면서 박막에 wrinkle 패턴이 형성되게 된다. 이 방법은 기판의 변형을 제어할 수 있기 때문에 wrinkle 폭과 높이를 다양하게 변화시킬 수 있다. 기판에 한 방향(x 혹은 y)으로만 변형을 주게 되면 1차원의 직선형 wrinkle이 형성되는데, 두 방향(x 그리고 y)으로 변형을 주게 되어 2차원 wrinkle 패턴을 형성하는 보고도 있다

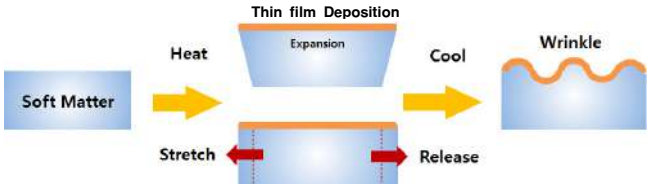


그림 2. Wrinkle의 형성 방법.

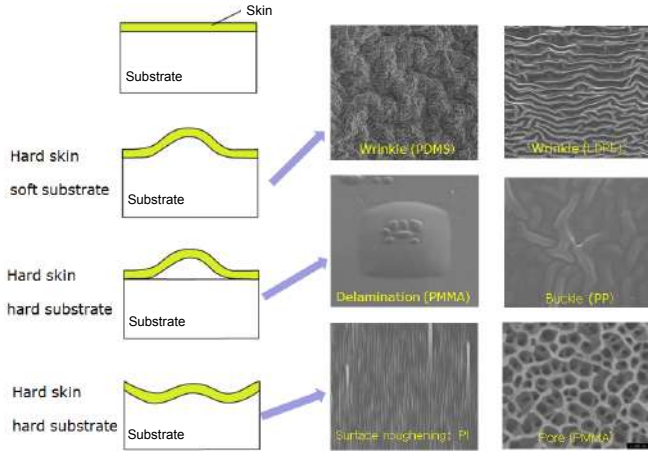


그림 3. 플라즈마와 이온빔 조사에 의해 고분자에 나타나는 다양한 패턴.

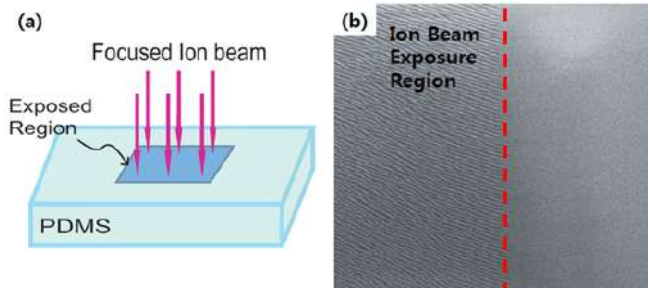


그림 4. 집속 이온빔을 이용한 고분자의 wrinkle 형성 (a)개념도와 (b)이온빔 조사에 따른 표면 구조 변형.[37]

(herringbone 등).

2.1.2 표면처리에 의한 Wrinkle 형성 방법

고체 표면에 플라즈마나 이온빔 등을 이용하여 표면처리를 하게 되면 물리적, 화학적, 광학적 특성 등의 다양한 특성이 변화하게 되는데, 이때 표면처리 조건 및 고분자의 성질에 따라서 ripple, wrinkle, hairy, hole 등의 패턴이 나노미터부터 마이크로미터 스케일까지 다양하게 형성된다(**그림 3**). 고분자가 상대적으로 무른(soft) 특성을 가지는 경우 표면에 이온빔이나 플라즈마를 조사하게 되면 표면의 고분자 층이 단단하게 경화되고 또한 이 경화된 층에 압축응력이 동시에 발생하게 된다. 이를 이용한 polydimethylsiloxane(PDMS) 기판의 표면을 이온빔 처리를 통해 경화시켜 wrinkle을 형성하는 방법이 있다. 2007년 본 연구 그룹에서는 평면 PDMS에 집속 이온빔(focused ion beam)을 조사하여 wrinkle 구조를 형성하는 방법을 제안하였다(**그림 4**). 이 방법의 경우 집속 이온빔의 세기와 조사 영역을 조절하여 다양한 패턴의 wrinkle 구조를 정교하게 만들 수 있다는 장점이 있다. 이온빔이 조사된 영역은 비정질 실리카(amorphous silica)와 비슷한 화학구조의 고분자로 변한 새로운 경질의 층이 형성되게 되며, 이 층은 기존의 PDMS 대비 약 100배의 높은 강성을 가짐과 동시에 이온빔의 조사방향과 수직한 방향으로 표면이 팽

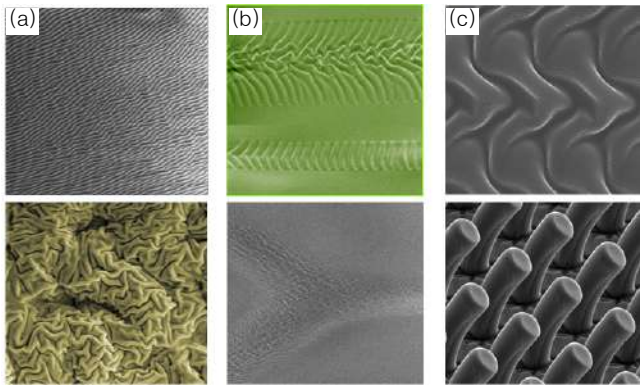


그림 5. 이온빔 조사에 의한 wrinkle 구조 형성. (a) 집속 이온빔의 세기에 따른 wrinkle 형상과 (b) 표면 패터닝, (c) 이온빔 조사를 이용한 3차원 구조 변형.[19,37]

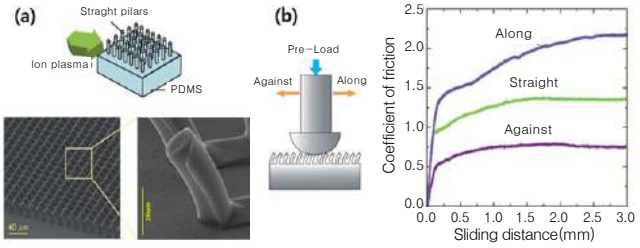


그림 6. Wrinkle 형성을 이용한 3차원 기둥 구조의 변형. (a) 개념도와 주사 전자 현미경 사진, (b) 기둥 구조의 경사진 방향에 따른 마찰계수값.[19]

창을 한다. 이때 새로 생긴 단단한 표면과 기판 사이의 변형률 차이로 인해 wrinkle 구조가 형성되게 된다. 특히 이온빔의 세기 1×10^{13} ions/cm^{2}에서는 1차원의 선형 wrinkle 구조가 형성되며(**그림 5(a)**), 이온빔의 세기가 5×10^{13} ions/cm^{2}에서는 헤링본(herringbone) 구조의 wrinkle이 형성된다. 이를 통해 이온빔의 세기가 wrinkle 구조의 형성에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 이러한 wrinkle 구조는 이온빔의 종류에 따라서 패터닝도 가능하게 된다. 특히 FIB를 이용한 wrinkle 형성 방법은 **그림 1(b)**와 같은 1~10 마이크로미터 크기의 폭을 가진 패턴 내에 0.5~1 마이크로미터 크기의 wrinkle 패턴을 형성할 수 있다. 이러한 이온빔에 의해서 형성된 wrinkle 패턴이 3차원 구조물의 옆면에 형성되게 되면 **그림 5(c)**에 나타난 것처럼 3차원 구조의 변형을 가능하게 할 수도 있고, 또한 3차원의 고-종횡비 wrinkle을 형성할 수도 있다.

그림 6은 wrinkle 형성과정을 이용한 기계적 응용 분야 중 하나로, wrinkle의 형성을 이용하여 제작한 기울어진 고분자 기둥 배열이다. 벽과 천정 및 나무를 오르내릴 수 있는 구조를 가진 도마뱀(gecko lizard)의 발바닥에 있는 경사진 미소섬유(setae)에서 착안하여, 강한 반데르 발스 힘을 갖는 물질을 제작하는 연구인데, 마이크로 단위의 PDMS 기둥 구조(pillar)의 한쪽 면에 이온빔(broad ion beam) 처리를 통하여 주름 형성을 유도하고 기둥구조를 특정한 방향으로 휘게 하여 접착면을 증가시키는 연구결과를 발표하였다.[19] 이온빔의 조사 각도 및 시간에 따라 PDMS 기둥구조의 각도가 달라지고, 이를 통해 접촉면적을 조절하여 방향에 따라 마찰계수가 달라지게 하였다(**그림 6(b)**).

2.2 Wrinkle 구조의 형상 제어 메커니즘

형성된 wrinkle 구조의 형상을 이해하기 위해 **그림 1(b)**와 같이 무른 기판 위에 단단한 박막을 증착시킨 간단한 개념도를 도입하였다.[20-25] 이때 박막은 h의 두께를 가지고, 형성된 wrinkle의 주기는 L, 높이는 W로 표현된다. 박막은 기판에 박리가 일어나지 않을 정도로 강하게 접착되어 있다고 가정하면 관련된 탄성에너지는 다음과 같은 평형을 이루게 된다.

Bending Strain Energy in Film	+	Work done by lateral force in film	=	Substrate deformation Energy in substrate

이러한 평형에서 박막/기판 시스템에 주어진 지배방정식(governing equation)에 의해 wrinkle의 주기(wavelength, L)와 높이(amplitude, W)는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega''''(x)-\frac{12T_m}{E_f h_f^3}\omega''(x)=-\frac{12}{E_f h_f^3}p(x)$$

$$L=4.08\cdot h_f(E_f/E_s)^{1/3}\quad\begin{cases}E_f=\text{박막의 탄성계수}\\E_s=\text{기판의 탄성계수}\end{cases}$$

$$W=h_f\sqrt{e_0/e_c-1}\quad\begin{cases}e_0=\text{가해진 변형률}\\e_c=\text{wrinkle 형성임계변형률}\end{cases}$$

위에서 구해진 wrinkle의 주기에 관한 식을 살펴보면, wrinkle의 주기는 오직 박막과 기판의 물성치값(탄성계수)과 박막의 두께에만 관계하며, 둘 사이의 응력이나 변형률과는 무관함을 알 수 있다.

2.3 고-종횡비 Wrinkle 구조

위식에서 나타난 것처럼 wrinkle 구조의 주기는 박막과 기판의 물성치에 의해서 결정이 되고, wrinkle의 높이 W는 $W\cong h(e_0/e_c-1)^{1/2}$으로 근사할 수 있다. 즉, 주어진 박막의 두께와 가해진 변형률의 크기에 의해서 wrinkle의 높이는 변화하게 되지만, 일반적으로 기판에 가해진 변형률은 고분자의 기계적 물성에 의해 제한을 받게 된다. 따라서 본 장에서는 앞서 설명한 wrinkle 구조 형성시의 한계를 극복하기 위해 도입한 새로운 개념의 wrinkle 구조 형성 방법을 소개하고자 한다. 본 방법에서는 기존의 wrinkle 구조 형성 방법 중, 고분자 PDMS 표면에 비정질 탄소막을 증착하는 방법에서 더 나아가 경사 입사 증착법(glancing angle deposition, GLAD)을 도입하고 이에 따른 비정질 탄소막의 증착률의 편차를 이용하여 고-종횡비 wrinkle 구조를 가지는 표면을 제작하였다. 비정질 탄소막은 낮은 마찰계수와 높은 내마모성으로 대표되는 뛰어난 기계적 성질로 인해 기계부품의 접촉면이나 생체재료의 표면 코팅 등, 보호막으로서 높은 활용도를 가져 산업에서 널리 활용되고 있으며,[26,27] 경사 입사 증착법은 물리기상증착법의 기술 중 하나로, 주상형 표면을 가지는 기능성 박막의 제조에 주로 사용된다. 이 기술을 통해 제작된 기능성 박막은 다양한 센서와 엑츄에이터(actuator)에서부터 광학 필터와 미세유체공학(microfluidics) 등 다양한 분야에 활용되고 있다.[28-32]

그림 7(a)에 고분자 PDMS의 표면에 탄화수소 이온빔을 경사를 주어 조사하여 고-종횡비 wrinkle 구조를 제작한 실험의 개념도를 나타내었다. 3가지의 서로 다른 입사각으로 50분 동안 증착된 비정질 탄소막의 wrinkle 구조를 주사전자 현미경(SEM, scanning electron microscopy)을 이용하여 관찰한 결과, wrinkle의 주기는 대략 750 nm 이하로 비교적 입사각에 큰 영향을 받지 않는 반면, wrinkle의 높이는 입사각에 비례하는 것을 볼 수 있었다(**그림 7(b-d)**). PDMS 기판에 수직하게 증착된 탄소막(θ=0°, **그림 7(b)**) 표면이 가지는 wrinkle의 높이는 평균적으로 144 nm로 약 1/5 이하의 종횡비를 가지며, 이때의 표면 형상을 보면 무른 PDMS 기판이 탄소막에 의해 2축 압축응력을

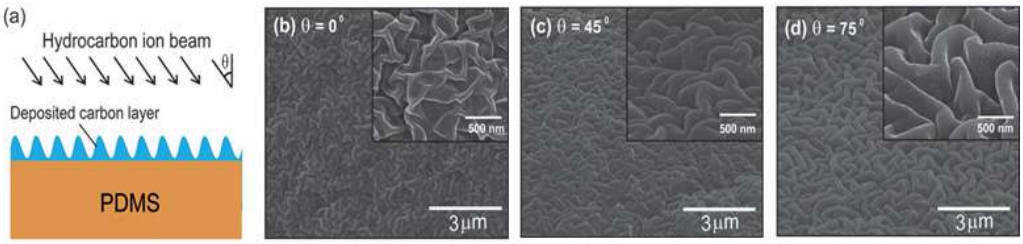


그림 7. 경사 입사 증착법을 이용한 고-종횡비 wrinkle 구조의 형성. (a) 실험 개념도와 (b-d) 이온빔의 입사 각도에 따른 wrinkle 형성 거동.[39]

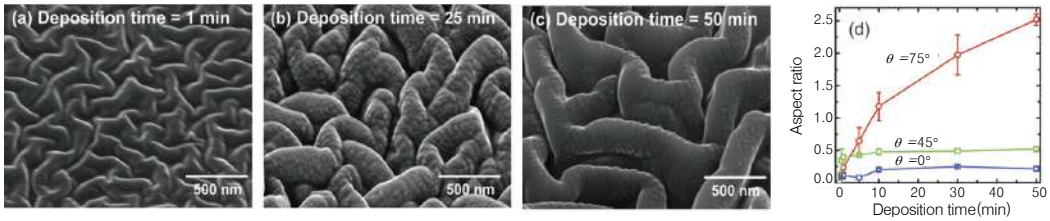


그림 8. 입사각과 증착시간이 주름형상에 미치는 영향. (a-c) 75°의 입사각으로 증착시간을 달리하여 형성된 표면의 주사전자현미경 사진과 (d) 입사각과 증착시간에 따른 주름구조의 종횡비.[39]

받아 비선형 wrinkle 구조를 형성함을 확인할 수 있다.[33,34] PDMS 기판에 45°와 75° 경사 입사 증착된 탄소막(**그림 7(c),(d)**) 표면이 가지는 wrinkle의 주기는 기판에 수직하게 증착된 경우와 비슷한 값을 가지나, 75° 경사 입사 증착된 탄소막의 wrinkle의 높이는 더 높은 값을 가져 약 2.5에 이르는 종횡비 값을 가진다.

증착 시간에 따른 wrinkle 구조의 종횡비 경향을 알아보기 위하여, 각각의 경사각에서 증착시간을 30초~50분으로 달리하여 증착된 탄소막의 wrinkle 구조 종횡비를 측정하였다(**그림 8(d)**). 입사각이 0°와 45°의 경우 종횡비가 상대적으로 시간에 무관하게 1/10과 1/2의 값을 가지는 반면, 75°의 높은 입사각으로 증착된 탄소막의 wrinkle 구조 종횡비는 상대적으로 증착시간에 비례하게 증가하여, 50분 증착시 약 2.5의 높은 종횡비 값을 가진다. **그림 8(a-c)**에 75°의 입사각으로 증착시간을 달리하여 제작한 wrinkle 구조의 주사전자 현미경 사진을 나타내었다. 증착 초기(t=1 min, **그림 8(a)**)에는 박막의 압축응력으로 야기된 변형에너지를 경감시키기 위하여 wrinkle 구조가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 경사 입사 증착이 진행됨에 따라(t=25 min, **그림 8(b)**) 이방성을 갖는 고-종횡비의 다공성 박막이 증착됨을 확인할 수 있었다. 이는 경사 입사 증착법의 원리에 따라 기판에 입사된 이온이나 라디칼 핵입자(radical nucleates)에 의한 원자단위의 shadowing 효과(atomic-scale shadowing or self-shadowing)에 의해 핵전면의 증착률이 핵후면의 증착률보다 높아졌기 때문이라 생각된다.[15,18]

2.4 고-종횡비 Wrinkle 구조의 형상 조절

2.4.1 제작 조건

앞서 소개한 경사 입사 증착법을 이용한 고-종횡비 wrinkle 구조 생성방법에 대한 개념을 좀더 확장하여, 고분자 표면의 전처리(pre-patterning)를 통하여 wrinkle 구조를 사전에 형성한 후 비정질 탄소막을 증착시키는 방법을 통해 고-종횡비 wrinkle 구조의 주기를 조절할 수 있다(**그림 9**). 우선, 아르곤 이온빔(Ar^+)의 조사를 통해 PDMS 표면에 전처리를 하게 되면, 아르곤 이온빔 처리 시간에 따라서 PDMS 표면에 wrinkle의 주기가 증가하게 되며 그 주기는 200~1400 nm의 주기를 가진다. 다음으로, PDMS 표면에 비정질 탄소막의 경사 입사 증착을 통해 wrinkle 주기를 제어한 PDMS 표면에 비정질 탄소막 증착

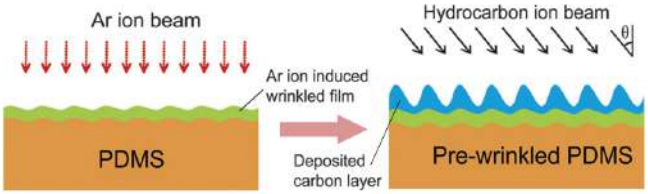


그림 9. 아르곤 이온빔(Ar^+) 전처리를 통해 형성된 주름표면을 가진 PDMS를 기판을 이용하여, 탄소막 경사 입사 증착법을 통한 고-종횡비 주름구조 제작의 개념도.[39]

을 통한 wrinkle 높이를 증가시키게 되어 고-종횡비를 가지는 wrinkle 구조를 형성할 수 있다. 비정질 탄소막 증착을 포함한 자세한 제작 조건은 다음과 같다.

기판이 되는 PDMS를 만들기 위해 주재료인 elastomer와 경화제인 cross-linker(Sylgard-184, Dow Corning, MI, USA)를 10 : 1의 질량비로 섞은 후, 기포를 제거한 뒤 80도의 오븐에서 2시간 가량 보관하여 경화시킨다. 이렇게 제작된 PDMS를 20×20×3 mm의 크기로 잘라 실험에 이용하였다.

PDMS 기판의 아르곤 이온빔 처리와 탄소막의 증착은 직진형 이온건(linear ion gun) 장비(DC 3 kV/6 kW, EN Technologies)에서 수행되었다.[35] PDMS 기판을 이온빔 챔버내, 이온빔으로부터 약 5 cm 이내의 거리에 놓고, 압력을 2×10^{-5} mbar 수준으로 진공을 설정한다. 아르곤 이온빔 처리를 위해 8 sccm의 유속으로 아르곤 기체를 end-hall 타입의 이온건으로 보내고, 1 kV의 전압과 50 μA/cm^2의 전류밀도로 이온빔의 세기를 유지한다. 또한 이때 기판 홀더에는 −600 V의 바이어스 전압을 걸어주는데, 이는 44 mA에 해당하는 전류 값을 가진다. 아르곤 이온빔 처리는 10초에서부터 50분에 이르기까지 조사시간을 다양하게 하여, 전처리된 wrinkle 구조의 주기를 다양하게 하였다. 이후, 탄소막의 증착은 평평한 PDMS와 전처리를 통해 wrinkle 구조가 형성된 PDMS에 진행되었으며, 이때 아세틸렌(acetylene, C_2H_2)가스를 8 sccm의 유량으로 흘려주어 전구체(precursor)로 사용하였다. 탄소막 증착시 이온빔의 전압은 1 kV로 유지시켰으며, 기판홀더의 바이어스 전압은 −200 V으로 유지하였다. 다양한 증착조건을 위하여 증착 시간은 30

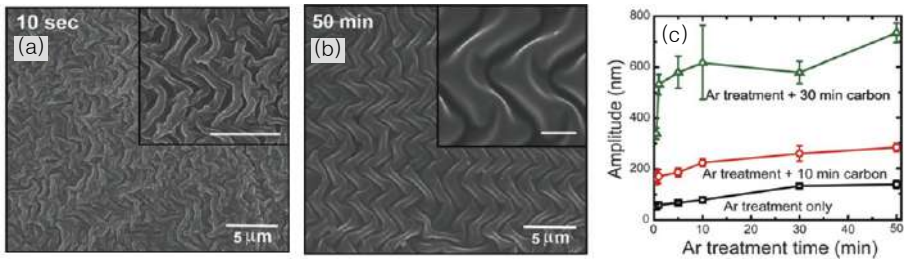


그림 10. (a, b) PDMS 기판에 시간을 다르게 하여 아르곤 이온빔 전처리를 하여 wrinkle 패턴을 형성한 후, 75°의 입사각으로 10분간 탄소막을 증착한 시편의 SEM 사진. (c) 형성된 주름구조의 높이.[39]

초에서 50분까지 다양화하였으며, 탄화수소이온의 입사각 또한 0°, 45°, 75°의 3가지 각도로 달리 하였다.

2.4.2 제작 결과

아르곤 이온빔 조사시간을 달리하여 전처리를 한 실험의 결과, PDMS는 이온빔이 조사됨에 따라 기존보다 강성도가 100배 가량 높은 고분자 표면을 형성하게 되고, 압축응력 조건하에 놓이게 된다.[19,36] 이때 형성되는 표면의 형상은 박막에 가해지는 응력에 따라 달라지는데, 형성되는 wrinkle 구조의 주기는 주로 막의 두께에 비례하며, 막과 기판의 탄성계수의 비에 비례한다. 앞서 소개한 식에 물성치를 대입하여 정리하면, $L=\alpha t(E_f/E_s)^{1/3}$과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 α는 상수로 평면변형조건하에서 약 $\alpha=4$의 값을 가진다.[10,37,38] 이온빔 조사 시간을 달리하여 PDMS에 생성된 wrinkle 구조의 주기를 측정하여 **그림 10**에 나타내었다. 이때 아르곤 이온빔은 10초(**그림 10(a)**)와 50분(**그림 10(b)**)까지 다양하게 조사되었다. 아르곤 이온빔에 의하여 PDMS 표면에 형성된 wrinkle 구조는 300~1500 nm의 주기를 가진다. 이와 같은 과정을 통해 wrinkle 구조의 주기는 이온빔 처리시간에 따라 조절이 가능함을 알 수 있다. 그 결과, 우리는 아르곤 이온빔 전처리를 통한 wrinkle 구조의 주기 조절이 가능하고, 비정질 탄소막의 증착을 통해 wrinkle 구조의 높이를 조절할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 방법을 통해서 wrinkle 구조의 종횡비는 기존의 1/10 정도에서 2.5 이상의 높은 값을 가질 수 있는 조건을 얻을 수 있었다.

3. 결론

우리는 본 특집에서 wrinkle 구조의 형성 원인과 형성된 마이크로/나노 단위의 wrinkle 구조를 이용한 기계적 활용 방안에 대해 몇가지 살펴보았다. 또한 wrinkle 구조의 제작 방법 중 집속 이온빔을 이용한 정교한 wrinkle 구조의 제작과 광 이온빔을 이용한 대면적 wrinkle 구조의 제작에 대해 알아보았으며, 이러한 표면 처리 방법을 통해 제작된 wrinkle 구조가 가지는 기계적 한계에 대해 살펴보았고 마지막으로, 그러한 한계를 극복할 수 있는 새로운 wrinkle 형상 제작 방법까지 알아보았다. 아직도 wrinkle 구조의 형성에 대한 한계를 극복하기 위한 다양한 연구가 진행 중에 있으며, 특히 wrinkle 구조를 이용한 실용적인 장치의 실현에는 더 많은 연구를 필요로 하고 있다. 또한 wrinkle 구조를 기반으로 한 새로운 재료의 성형은 아직 밝혀지지 않은 많은 물질의 새로운 성질을 만들어 내는데 일조할 것이라 생각된다. 앞으로도 wrinkle 구조의 형상 조절과 다른 재료와의 융합에 관한 지속적인 연구를 통해 다양한 분야에서 wrinkle 구조가 활약할 날을 기대해 본다.

참고문헌

1. *Handbook of Non-Invasive Methods and the Skin*, J. Serup and G. B. E. Gemec, Editors, CRC Press, Boca Raton, FL, 1995.
2. B. F. van Duzee, *J. Invest. Dermatol.,* **71**, 40 (1978).
3. C. M. Stafford, C. Harrison, K. L. Beers, A. Karim, E. J. Amis, M. R. Vanlandingham, H. Kim, W. Volksen, R. D. Miller, and E. E. Simonyi, *Nat. Mater.,* **3**, 545 (2004).
4. K. Efimenko, M. Rackaitis, W. Manias, A. Vaziri, L. Mahadevan, and J. Genzer, *Nat. Mater.,* **4**, 293 (2005).
5. M.-W. Moon, H. M. Jensen, J. W. Hutchinson, K. H. Oh, and A. G. Evans, *J. Mech. Phys. Solids,* **50**, 2355 (2002).
6. W. T. S. Huck, *Nat. Mater.,* **4**, 271 (2005).
7. E. P. Chan and A. J. Crosby, *Soft Matter,* **2**, 324 (2006).
8. D. Y. Khang, H. Q. Jiang, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Science*, **311**, 208 (2006).
9. J. Genzer and J. Groenewold, *Soft Matter,* **2**, 310 (2006).
10. N. Bowden, S. Brittain, A. G. Evans, J. W. Hutchinson, and G. M. Whitesides, *Nature*, **393**, 146 (1998).
11. X. Jiang, S. Takayama, X. Qian, E. Ostuni, H. Wu, N. Bowden, P. LeDuc, D. E. Ingber, and G. M. Whitesides, *Langmuir,* **18**, 3273 (2002).
12. E. P. Chan, E. J. Smith, R. C. Hayward, and A. J. Crosby, *Adv. Mater.,* **20**, 711 (2008).
13. C. Harrison, C. M. Stafford, W. Zhang, and A. Karim, *Appl. Phys. Lett.,* **85**, 4016 (2004).
14. S. Chung, J. H. Lee, M.-W. Moon, J. Han, and R. D. Kamm, *Adv. Mater.,* **20**, 3011 (2008).
15. W. J. Babler, *Art. Ser.,* **27**, 95 (1991).
16. M. Kücken and A. C. Newell, *Europhys. Lett.,* **68**, 141 (2004).
17. N. J. Price and J. W. Cosgrove, *Analysis of Geological Structure*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
18. P. J. Huddleston and L. Lan, *J. Struct. Geol.,* **15**, 253 (1993).
19. M. W. Moon, T. G. Cha, K. R. Lee, A. Vaziri, and H. Y. Kim, *Soft Matter,* **6**, 3924 (2010).
20. M. A. Biot, *Proc. R. Soc. London, Ser. A,* **242**, 444 (1957).
21. M. A. Biot, *Mechanics of Incremental Deformation*, Wiley, New York, 1965.
22. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Elasticity Theory*, Nauka, Moscow, 1965.
23. S. Timoshenko, *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill, New York, 1988.
24. D. O. Bush and B. O. Almroth, *Buckling of Bars, Plates and Shells*,

McGraw-Hill, New York, 1975.
25. H. G. Allen, *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels,* Pergamon, New York, 1969.
26. R. K. Roy and K.-R. Lee, *J. Biomed. Mater. Res., Part B,* **83b**, 72 (2007).
27. M. Anil, S. F. Ahmed, J. W. Yi, M.-W. Moon, K.-R. Lee, Y. C. Kim, H. K. Seok, and S. H. Han, *Diamond Relat. Mater.,* **19**, 300 (2010).
28. M. J. Brett and M. M. Hawkeye, *Science*, **319**, 1192 (2008).
29. J. J. Steele and M. J. Brett, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.,* **18**, 367 (2007).
30. K. M. Krause and M. J. Brett, *Adv. Funct. Mater.,* **18**, 3111 (2008).
31. M. T. Taschuk, J. B. Sorge, John J. Steele, and M. J. Brett, *IEEE Sens. J.,* **8**, 1521 (2008).
32. M. A. Summers and M. J. Brett, *Nanotechnology*, **19**, 415203 (2008).
33. M.-W. Moon and A. Vaziri, *Scr. Mater.,* **60**, 44 (2009).
34. Y. Rahmawan, K. J. Jang, M.-W. Moon, K.-R. Lee, K.-S. Kim, and K. Y. Suh, *Langmuir*, **26**, 484 (2010).
35. S. F. Ahmed, J. W. Yi, M.-W. Moon, Y.-J. Jang, B. H. Park, S.-H. Lee, and K.-R. Lee, *Plasma Processes Polym.,* **6**, 860 (2009).
36. M.-W. Moon, S. H. Lee, J.-Y. Sun, K. H. Oh, A. Vaziri, and J. W. Hutchinson, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.,* **104**, 1130 (2007).
37. H. G. Allen, *Analysis and design of structural sandwich panels,* Pergamon, New York, 1969.
38. X. Chen and J. W. Hutchinson, *Scr. Mater.,* **50**, 797 (2004).
39. S. F. Ahmed, G.-H. Rho, K.-R. Lee, A. Vaziri, and M.-W. Moon, *Soft Matter*, **6**, 5709 (2010).