생체모방형 섬유 설계: 곤충, 식물, 해양 생물에서 영감을 받은 기능성 텍스타일의 연구 동향

김주란

- 2000–2004. 숙명여자대학교 의류학 학사
- 2008–2010. 조지아대학교 섬유공학 석사
- 2010–2014. 노스캐롤라이나주립대학교 섬유고분자공학 박사
- 2014–2017. 코넬대학교 섬유공학 박사후연구원
- 2019–2023. 한국생산기술연구원 선임연구원
- 2024–현재. 한국생산기술연구원 수석연구원

1. 서 론

생체모방(biomimetics)은 자연계의 구조와 기능을 모사하여 인공 소재 및 시스템을 설계하는 혁신적 연구 분야로, 최근 섬유공학 및 기능성 직물 개발에서 중요한 역할을 차지하고 있다. 곤충의 눈, 날개, 식물의 잎, 해양 생물의 표피와 같은 자연 구조는 수백만 년의 진화를 통해 뛰어난 기능을 발휘하도록 최적화되어 있으며, 이는 섬유 및 직물의 기능성 향상을 위한 풍부한 영감을 제공한다. 예를 들어, 나방눈(moth-eye)의 나노구조는 저반사 및 발수 기능을 동시에 구현하며, 잠자리 날개(dragonfly wing)의 나노필라 구조는 기계적 항균 효과를 발휘한다. 또한, 연잎(lotus leaf)의 계층적 마이크로·나노 구조는 초발수 및 자가세정(superhydrophobic self-cleaning)을 가능하게 하며, *Stenocara* 딱정벌레의 하이브리드 습윤 패턴은 물 수확(water harvesting)을 가능케 한다. 나아가 해양 생물에서 영감을 받은 상어 피부(shark skin) 패턴은 항박테리아성과 유체 저항 감소에 활용되고, 홍합(mussel)의 접착 단백질은 섬유 기능화 및 내구성 향상에 응용되고 있다. 본 고에서는 곤충·식물·해양 생물에서 영감을 얻은 생체모방형 섬유 설계의 최신 연구 동향을 체계적으로 정리하고, 기능성 직물 개발을 위한 새로운 방향을 모색하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 곤충에서 영감을 받은 섬유

나방눈 구조는 파장보다 작은 주기(~100–300 nm)의 콘(nipple) 배열을 통해 유효 굴절률 구배를 형성함으로써 광대역 반사를 억제하고 동시에 발수·자가세정 특성을 부여하는 대표적 생체모방 표면이다(*Figure* 1(a)). 이를 텍스타일에 적용하기 위해 롤-투-롤 나노임프린트 리소그래피(R2R-NIL) 기반의 PMMA 또는 우레탄 필름을 제조한 뒤 직물에 라미네이션하는 방식이 개발되었으며, 압력·속도·온도와 같은 공정 변수 조절을 통해 콘 형상과 저반사 성

능을 정밀하게 최적화할 수 있음이 보고되었다[1]. 또한 유리카본 기반의 대면적 롤 금형을 활용하면 발수 성능을 유지하면서도 표면 손상을 최소화하여 생산성과 수율을 향상시킬 수 있으며, 여기에 무기 또는 불소계 박막을 얇게 코팅하면 내마모성 및 오염 저항성을 크게 개선하면서 난반사 억제와 발수 성능을 동시에 달성할 수 있음이 보고되었다.

잠자리(diplacodes bipunctata) 날개 표면에는 직경 수십–수백 nm, 높이 수백 nm 수준의 치밀한 나노필러 배열이 분포한다(*Figure* 1(b))[2]. 이러한 구조는 단순한 소수성일 뿐만 아니라, 세균이 접촉할 때 세포벽에 국소적인 고응력을 부과하여 세포막을 물리적으로 파열시키는 메카노-박테리사이드(mechano-bactericidal) 작용을 유발한다(*Figure* 1(c)). 이 원리는 화학적 항균제 없이도 건식 조건(dry state)에서 장기간 항균성을 유지할 수 있는 점에서 차별적이다. 또한, 필러 배열은 표면 에너지를 낮추어 초발수·자가세정(superhydrophobic, self-cleaning) 성능도 동시에 발현된다고 보고되고 있다[3].

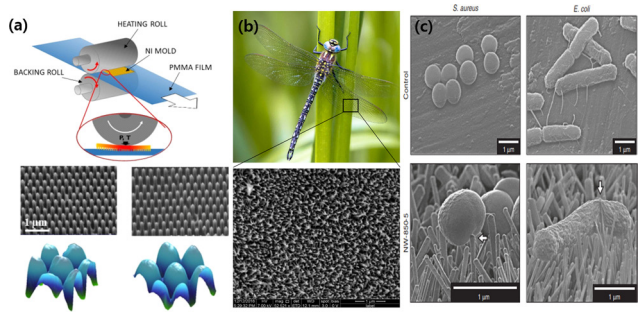

Figure 1. 곤충 모사 섬유 (a) 나방눈 구조의 나노콘을 이용한 발수 자가세정 기능[1], (b) 잠자리 날개 나노필러 구조[2], (c) 나노필러 구조를 이용한 항균 효과[3].

나미브 사막 딱정벌레의 등판은 친수성 돌기(hydrophilic bumps)와 소수성 배경(superhydrophobic background)이 공존하는 독특한 미세구조를 지녀 공기 중의 미세 물방울을 효율적으로 응축·집수한다[4]. 이러한 원리를 모사하여, 섬유 표면에 플라즈마 표면 처리 또는 스프레이 코팅을 통해 친수/소수 패턴을 부여하면 안개 집수 기능을 갖는 고기능성 텍스타일을 구현할 수 있다(*Figure* 2(a)). 최근에는 잉크젯 프린팅 기반 미세 패터닝을 적용하여 직물 전면에 대면적으로 구현하면서도 국소적인 친수 영역을 정밀하게 제어하는 방법이 보고되었으며, 이로써 기존 금속 메시 기반 집수 장치보다 경량·유연성이 뛰어난 직물형 집수소재가 개발되고 있다(*Figure* 2(b))[5]. 또 다른 연구에서는 *Stenocara* 딱정벌레 등껍질의 이종(친수–초소수성) 패턴을 모사하여 간단한 직조 방식으로 제작한 직물이 보고되었으며, 1267.2 mg h^{-1} cm^{-2}의 높은 물 수확률을 달성하였다(*Figure* 2(c)). 또한 이 직물은 10회 재사용 후에도 water harvesting 성능이 거의 변하지 않아, 섬유 산업과 환경 보존을 연결할 수 있는 대량생산형 물 수확 소재로서의 잠재력을 보여주었다[6]. 딱정벌레의 딱지(elytra)는 미세한 리브(rib)와 다공성 미세구조를 통해 충격 하중을 효과적으로 분산시키고, 동시에 수분 침투를 억제하는 기능을 지닌다(*Figure* 2(d)). 이를 모사하기 위해 섬유 표면에 리브형 엘라스토머 코팅을 형성하거나, 전기방사 기반의 다공성 나노섬유층을 도입하는 방식이 연구되고 있다[7]. 특히 3D 프린팅을 통해 리브 구조를 직접 텍스타일에 가공하는 시도가 이루어지고 있으며, 이는 방탄복, 고강도 작업복, 스포츠·레저 안전장비와 같은 고내충격성 섬유 개발에 적용되고 있다[8].

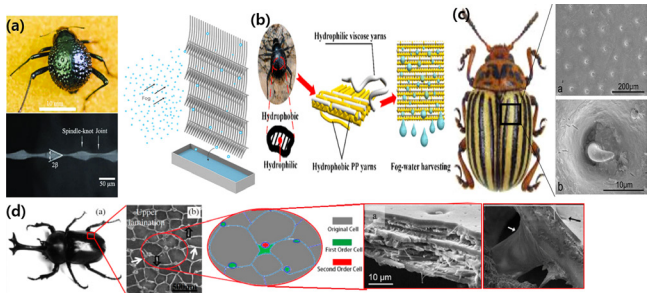

Figure 2. (a) 사막 Onymacris의 표면구조를 이용한 안개 포집[4], (b) *Stenocara*류의 안개 포집[5], (c) 사막 딱정벌레 elytra 표면의 물방울 포집 기능[6], (d) 딱정벌레의 표면 허니콤 구조를 이용한 고내충격성 기능[8].

2.2. 식물에서 영감을 받은 섬유

연잎의 마이크로-나노 계층 거칠기와 저표면에너지 왁스층을 모사해, 섬유 표면에 거칠기(실리카/폴리머 나노입자, 전기방사, 레이저/플라즈마 텍스처링)와 저표면에너지 코팅을 결합하는 전략은 기존에 많이 연구되었다(*Figure* 3(a-c)). 최근에는 초발수 섬유의 설계변수(거칠기 스케일·결합강도·세탁 내구)와 응용을 체계화하며, 특히, 환경 규제에 대응한 불소-프리 접근(셀룰로스·리그닌·키토산 등 바이오기반 코팅) 방법과 자연 모사를 이용한 표면 구조 다양화 방법이 연구되고 있다.

벌잡이통 식물 네펜데스(nepenthes)의 퍼리스톰(peristome)은 표면에 윤활액이 유지되는 독특한 구조로, 곤충이 미끄러져 빠져나오지 못하게 하는 기능을 가진다. 이러한 원리를 모사하여 개발된 Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces(SLIPS)는 다공성 기판에 윤활액을 주입하여 저접착·저마찰을 기능을 구현

하는 방법이 소개되었다(*Figure* 3(d-f)). 특히 이 연구에서는 기공 설계(표면 친화성·기공 구속력 제어), 윤활액 선택(점도, 증기압 안정성), 표면화학적 앵커링을 통한 내구성 향상 전략을 제시하고 솔-젤 및 식각 기술을 활용한 대면적 다공성 기판 제조와 간편 주입(one-step SLIPS) 공정을 통해 항빙, 집수, 오염 방지, 항균 기능과 같이 다기능성이 동시에 구현될 수 있는 차세대 표면 구조로 평가되고 있다[9].

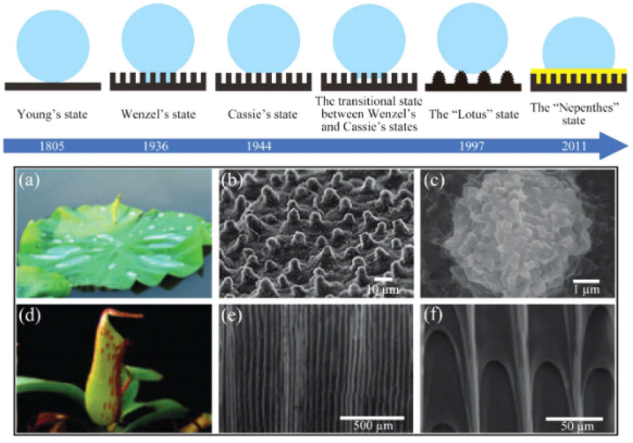

Figure 3. (a) 연꽃 잎의 광학 사진 (b) 10 μm 및 (c) 1 μm에서 관찰한 연꽃 잎의 현미경 사진 (d) 네펜데스(*Nepenthes,* 벌레잡이통풀)의 광학 사진. (e) 500 μm 및 (f) 50 μm에서 관찰한 네펜데스의 현미경 사진[9].

솔방울은 습도 변화에 따라 인편이 비대칭적으로 흡습·팽윤하면서 굽힘 또는 개폐 운동을 수행하는데 이러한 원리는 섬유 및 직물에서 능동적 습도 구동 구조로 번안되었으며, 특히 피부-외기 간의 일방향 수분 이동(moisture diode) 개념에 적용될 수 있다(*Figure* 4(a)). 이를 모사한 Janus 섬유(내측 친수성/외측 소수성)는 땀을 외부로 끌어내 증발을 촉진하고, 착용자의 체열 관리와 바이오유체 센싱(상처 드레싱·호흡 마스크)까지 가능하다. 최근에는 셀룰로스 기반 Janus 직물이 경량·쾌적성을 유지하면서 3-4 ℃의 쿨링 효과를 보고했으며, 면 기반 Janus에서는 삼중 냉각(*triple cooling*)/유도 증발 설계가 제안되고 있다[10].

대리석 베리(*pollia condensata*)는 세포벽에 나선형으로 적층된 셀룰로스 미세섬유 다층구조를 갖고 있어, 브래그 반사(bragg reflection)에 의해 강렬한 푸른 구조색(iridescence)을 발현할 수 있다(*Figure* 4(b)). 이 색은 알려진 어떤 생물 재료보다도 강도가 높으며, 세포마다 층 두께가 달라 픽셀화된 색 분포를 나타낸다. 더 나아가 동일 조직 내에서 좌·우 원형 편광 반사가 동시에 나타나는 독특한 광학적 특성이 보고되었으며, 이는 차세대 광학 센서 및 색소 프리 디스플레이용 광섬유 및 소자 설계에 영감을 줄 수 있다[11].

에델바이스(*Leontopodium nivale*)는 잎 표면에 백색 털층(hairy layer)을 발달시켜 강한 태양광을 반사하고 자외선 손상을 완화할 수 있는 구조이다(*Figure* 4(c)). 특히 포플러 잎의 중공 구조 섬유는 균일한 고체 섬유에 비해 단위 두께당 더 강한 후방 산란(backscattering)과 반사율을 보여, 고효율 쿨링 섬유 설계에 응용이 가능하다[12]. 이는 섬유 직경 및 기공 크기가 태양광 파장과 유사해 광대역 산란체로 작용하기 때문이며, 햇빛 반사를 통해 고온에 의한 수분 손실을 줄여 잎의 시듦(wilting) 방지 기능을 수행한다. 이러한 원리를 적용한 섬유는 냉감 또는 쿨링 섬유에 활용될 수 있다[12].

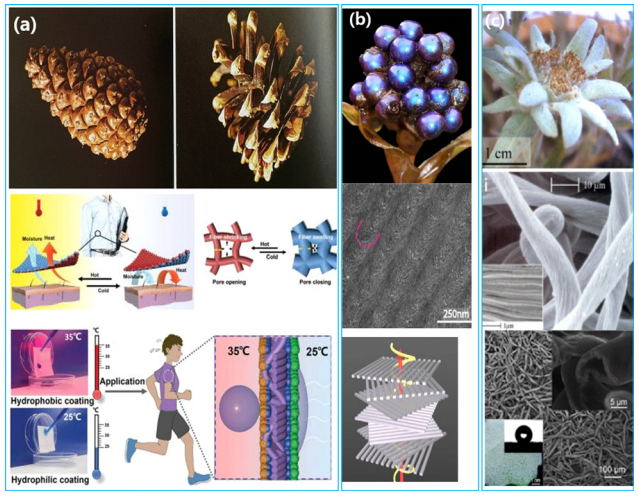

Figure 4. (a) 솔방울의 비대칭 흡습 팽윤을 이용한 Janus cellulose 섬유[10] (b) 대리석 베리(*pollia condensata*) 열매의 광학 특성을 이용한 반사 직물[11] (c) *Leontopodium nivale* 코어-쉘 구조를 이용한 쿨링 섬유[12]

2.3. 해양 생물에서 영감을 받은 섬유

상어 피부는 치아 모양의 미세한 돌기(denticle) 패턴으로 이루어져 있어 유체 흐름을 제어하고 난류 발생을 억제하여 마찰 저항을 낮출 수 있는 생체구조이다. 또한 이는 세균 및 해양 부착생물의 정착을 억제하는 효과가 보고되었다[13]. 이를 모사하여 3D 마이크로몰드 패터닝이나 레이저 표면 가공으로 직물 표면에 미세 돌기 구조를 구현하면 수영복, 스포츠웨어에서 유체 저항을 줄일 수 있으며, 의료용 방호복이나 병원용 텍스타일에서는 항균성 부여에도 응용될 수 있다. 상어 피부의 리블렛 구조는 유체 저항 감소와 오염 방지 기능을 제공하며, 이를 모사해 PDMS 기반 직접 잉크 프린팅으로 유연한 항저항·방오 표면이 제작되었다(*Figure* 5(a)). 실험 결과 미세 돌기 구조의 표면

은 최대 18.16%의 항력 저감을 달성했으며, 탁월한 오염 저항성도 증가한 것으로 보고되고 있다[14]. 이러한 생체모방형 표면 설계는 다양한 텍스타일 분야에서 사용될 것으로 기대된다.

홍합의 족사단백질은 습윤 환경에서도 강력한 접착력을 나타내는 카테콜(catechol) 기능기를 가진다. 이를 모사하여 도파민(polydopamine) 코팅을 섬유에 적용하면, 표면 활성화·기능성 나노입자 고정·내구성 향상 효과가 나타난다. 예를 들어, 도파민 코팅 섬유는 은 나노입자, TiO_2, MOF 등 다양한 기능성 소재를 안정적으로 고정할 수 있어 항균, 자정화, 촉매 기능을 동시에 구현할 수 있다[15]. 이는 의료용 섬유나 다기능 환경 정화 필터에 응용 가능하다.

해파리 촉수가 가지는 투명·연성 구조는 유연한 광전 특성과 감지 기능성 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 최근에는 투명 고분자 섬유 및 수분 감응 나노섬유 센서가 개발되고 있으며, 젤(gel)-기반의 전기방사 섬유는 생체친화적 웨어러블 센서로 연구되고 있다[16]. 이는 인체 착용형 바이오 모니터링 텍스타일에 응용될 수 있다. 특히 최근에는 해파리에서 영감을 얻어 계층적 교차결합 네트워크를 설계하여 외부 손상 시 스스로 재결합할 수 있고 절단·균열된 이온겔 네트워크가 시간이 지나면 자가 치유성과 내구성을 확보하여 로봇 피부나 스마트 웨어러블분야에 적용 가능성을 보여주는 연구도 보고되고 있다(*Figure* 5(b))[16].

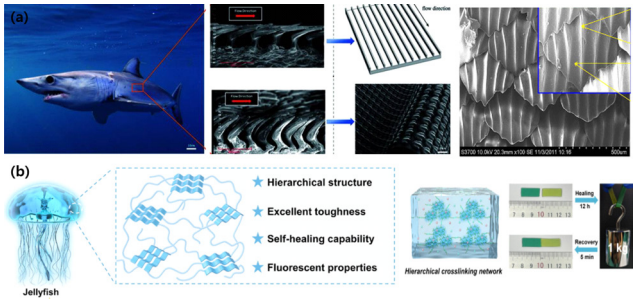

Figure 5. (a) 상어의 미세 돌기(denticle)을 모사한 표면[14], (b) 해파리의 계층적 교차결합 네크워크를 이용한 자가치유 기능[16].

3. 결 론

생체모방 기반 섬유 설계는 자연의 정교한 구조와 기능을 인공 소재에 접목하여, 기존 섬유의 한계를 극복하고 새로운 기능을 부여하는 강력한 전략임이 확인되었다. 곤충의 나노패턴은 저반사, 항균, 발수 기능을 제공하고 식물의 계층 구조는 초발수, 빛 산란, 색 발현 기능을 제공하며 해양 생물의 표피 구조는 항박테리아, 내충격성, 접착 및 내구성, 항오염 기능을 제공한다. 특히 최근 연구에서는 나노임프린트, 전기방사(electrospinning), 레이저 가공, 계층적 자가조립 등 첨단 제조기술과 결합하여 대면적·대량생산이 가능한 공정들이 활발히 개발되고 있다. 향후에는 생체모방 구조와 기능을 멀티스케일(multi-scale)로 통합하고, 지속가능한 소재(바이오 기반 고분자, 친환경 코팅 등)와 융합함으로써 환경 문제 해결과 고기능성 섬유 개발을 동시에 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. A. Jacobo-Martín, M. Rueda, J. J. Hernández, et al., Bioinspired antireflective flexible films with optimized mechanical resistance fabricated by roll to roll thermal nanoimprint, *Sci Rep*, 2021, **11**, 2419.
2. J. Jenkins, J. Mantell, C. Neal, et al., Antibacterial effects of nanopillar surfaces are mediated by cell impedance, penetration and induction of oxidative stress, *Nat Commun*, 2020, **11**, 1626.
3. B. P. Kamarajan, M. Ananthasubramanian, L. Sriramajayam, and A. Boppe, Behavior of Pseudomonas aeruginosa strains on the nanopillar topography of dragonfly(Pantala flavescens) wing under flow conditions, *Biointerphases* 2021, **16**(5).
4. S. Kennedy and J. B. Boreyko, Bio-Inspired Fog Harvesting Meshes: A Review, *Adv, Funct, Mater*, 2024, **34**, 2306162.
5. Z. Yu, H. Zhang, J. Huang, S. Li, S. Zhang, Y. Cheng, J. Mao, X. Dong, S. Gao, and S. Wang, Namib desert beetle inspired special patterned fabric with programmable and gradient wettability for efficient fog harvesting, *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, **61**, 85-92.
6. M. Sun, A. Liang, G. S. Watson, J. A. Watson, Y. Zheng, and L. Jiang, Compound microstructures and wax layer of beetle elytral surfaces and their influence on wetting properties, **2012**. e46710.
7. J. Du and P. Hao, Investigation on Microstructure of Beetle Elytra and Energy Absorption Properties of Bio-Inspired Honeycomb Thin-Walled Structure under Axial Dynamic Crushing, *Nanomaterials*, 2018, **8**, 667.
8. Y. Gao, J. Wang, W. Xia, X. Mou, and Z. Cai, Reusable Hydrophilic–Superhydrophobic Patterned Weft Backed Woven Fabric for High-Efficiency Water-Harvesting Application. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, **6**(6), 7216-7220.
9. L. Xia, S. Zhang, and Z. Guo, Multifunction of Biomimetic Liquid

Infused Systems Derived from SLIPS Theory: A Review. *Adv. Mater. Interfaces* 2023, **10**, 2202212.

10. X. Li, Q. Wang, L. Zheng, and T. Xu, Smart Janus textiles for biofluid management in wearable applications. *Iscience*, 2024, **27**(3).
11. M. Heather Whitney et al., Floral Iridescence, Produced by Diffractive Optics, Acts As a Cue for Animal Pollinators. *Science*, 2009, **323**, 130-133.
12. Z. Yan, H. Zhai, D. Fan, and Q. Li, Biological optics, photonics and bioinspired radiative cooling. *Progress in Materials Science* 2024, **144**, 101291.
13. G. Tian, D. Fan, X. Feng, and H. Zhou, Thriving artificial underwater drag-reduction materials inspired from aquatic animals: progresses and challenges, *RSC, Adv*, 2021, 18, **11**(6), 3399-3428.
14. X. Pu, G. Li, and H. Huang, Preparation, anti-biofouling and drag-reduction properties of a biomimetic shark skin surface, Biology open 2016, 5.
15. G. Miao, F. Li, Z. Gao, T. Xu, X. Miao, G. Ren, Y. Song, X. Li, and Z. Xiaotao, Ag/polydopamine coated textile for enhanced liquid/liquid mixtures separation and dye removal, *iScience* 2022, **25**, 104213.
16. Z. Zhipeng, L. Qian, B. Zhang, C. Ma, and G. Zhang, Jellyfish-Inspired Polyurea Ionogel with Mechanical Robustness, Self-Healing, and Fluorescence Enabled by Hyperbranched Cluster Aggregates, *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, **63**, e202410335.