

ORIGINAL ARTICLE

## 덩굴식물 접착근의 구조적 형태 비교 및 응용 가능성

백신유 · 배해진\*

국립생태원 생태신기술팀

### Structural Characteristics and Environmental Applications of Adhesive Aerial Roots in Climbing Plants

Shinyu Baek, Haejin Bae\*

Ecological Technology Research Team, National Institute of Ecology, Seochenon-gun 33657, Korea

#### Abstract

This study investigated the structural characteristics and environmentally adaptive adhesion mechanisms of adhesive aerial roots in the climbing plants ivy (*Hedera helix*), Asian jasmine (*Trachelospermum asiaticum*), and pothos (*Epipremnum aureum*). The adhesive aerial roots of each species were examined using a smart high-resolution stereo microscope and low-vacuum scanning electron microscopy (LV-SEM) to compare surface morphology, trichome organization, internal tissue structure, and density characteristics. The results showed that ivy forms a nanoparticle-based adhesive layer and exhibits high tissue density, resulting in strong attachment capability. Asian jasmine has a surface-conforming adhesion structure that accommodates microtopographical irregularities, whereas pothos possess elongated aerial roots that are capable of concurrent water absorption. These findings demonstrate that each species has an optimal attachment system that responds to environmental conditions. The structural principles revealed here provide a biological basis for the development of biodegradable adhesives, plant-material interface designs, and eco-friendly bonding technologies for environmental engineering applications.

**Key words** : Adhesive root, Climbing plant, Biomimetics, Bioinspired adhesive materials

#### 1. 서 론

덩굴식물(climbing plants)은 지지체에 부착하여 성장하는 독특한 생태적 전략을 보인다. 이러한 부착 시스템은 최근 생태모방(biomimetic) 및 환경소재공학(environmental materials engineering) 분야에서 자연 기반 접착 모델로 주목받고 있다(Burriss et al., 2018). 이 식물은 덩굴손(tendrils), 부착패드(adhesive pad), 그리고 줄기나 마디에서 발생하는 접착성 기근(adhesive aerial root) 등 다양한 형태의 부착 기관을

발달시켜 지지체와의 접촉면을 형성한다(Liu and Gao, 2022). 이 가운데 접착성 기근(adhesive aerial root)은 뿌리 이외의 기관에서 발생하는 뿌리인 부정근(adventitious root)의 한 형태로, 지상 줄기 부위에서 나오는 뿌리를 의미한다(Lee, 2016). 식물에 따라 부착근 및 접착근 또는 기근 등으로 불린다. 접착성 기근은 덩굴식물의 주요 부착 전략 중 하나로, 단순히 식물체를 고정하는 기능을 넘어 주변 환경으로부터 수분과 영양분을 보조적으로 흡수하는 역할도 수행한다(Lee, 2016). 이러한 기능은 기근의 미세 구조, 표면의 형태

Received 18 November, 2025; Revised 4 December, 2025;

Accepted 8 December, 2025

\*Corresponding author : Haejin Bae, Ecological Technology Research Team, National Institute of Ecology, Seochenon-gun 33657, Korea  
Phone : +82-41-950-5627  
E-mail : hjbae@nie.re.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
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.

적 특성, 그리고 점착물질의 화학적 조성 간의 정교한 상호작용을 통해 발현된다. 결과적으로 점착성 기근은 단단하면서도 유연한 부착을 가능하게 하여, 다양한 표면 재질과 환경 변화 속에서도 안정적인 생장을 유지할 수 있도록 한다(Lee and Kim, 2011).

아이비는 점착근 연구의 대표적 모델 식물로, 줄기에서 발생한 기근의 뿌리털(root hair)이 나노 크기의 입자를 포함한 점착성 물질을 분비하여 매끄러운 표면에도 강한 점착력을 형성하는 것으로 보고되어 있다(Melzer et al., 2010). 반면, 백화등은 대표적인 착생 식물(epiphyte)로서, 나무줄기나 암석의 미세한 틈새에 점착근을 밀착시켜 부착한다(Woo and Yang, 2012). 스킨답서스는 줄기에서 발생한 기근이 지지체를 따라 뻗으며 부착과 수분 흡수를 동시에 수행한다(Yang and Deng, 2017).

세 식물의 특성을 비교하면 생태적 배경과 형태적 특성에는 차이가 있지만 점착성 기근의 기본적인 구조적 원리는 공통적이다. 이는 점착성 기근이 단순한 물리적 점착 기관을 넘어, 환경에 적응한 점착 시스템을 시사한다. 따라서 본 연구는 세 종의 덩굴식물을 대상으로 환경 적응적 부착 시스템에 관여하는 점착성 기근의 구조적·형태적 특성을 비교하여 친환경 점착 기술 및 생체모방 환경소재 설계의 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 재료 및 시료 준비

본 연구에는 점착성 기근을 발달시키는 덩굴식물 3종, 아이비(*Hedera helix*), 백화등(*Trachelospermum asiaticum*) 그리고 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)를 사용하였다. 모든 시료는 충남 서천 지역 농원에서 확보하여 분석하였다. 이들 식물은 생태적 배경이 상이하나, 줄기 또는 마디에서 점착성 기근을 형성한다는 특징을 공통점으로 가진다.

### 2.2. 현미경 분석

기초적인 형태 분석은 스마트 고해상도 실체현미경(Smartzoom 5, ZEISS)으로 수행하였다. 실체 현미경 분석에 사용된 시료는 점착성 기근이 포함된 가지를 절단하여 신선한 상태로 준비하였다. 관찰은 11×, 25×,

50×, 100× 배율에서 수행하였으며, 점착성 기근의 배열 형태, 길이, 털 분포, 부착 위치를 분석하기 위해 각 종당 10개 이상의 샘플을 분석하여 대표 이미지를 선정하였다.

점착성 기근의 미세구조와 표면 조직은 저진공주사 전자현미경(LV-SEM)을 이용하여 관찰하였다. LV-SEM(JSM-IT300, JEOL Ltd.) 분석을 위한 시료는 점착성 기근 부분을 절단한 후 고정 및 탈수 과정을 포함한 전처리를 진행하였다. 먼저 시료를 고정액[2% GA (Glutaraldehyde) + 2% PA (Paraformaldehyde) (in 0.05M cacodylate buffer pH 7.2)]에 넣어 실온에서 4시간 고정하였다. 이후 고정액을 제거한 후, 0.05M cacodylate buffer로 30분 간격으로 3회 세척하였다. 1% OsO<sub>4</sub>(in 0.05M cacodylate buffer pH 7.2)로 fume hood에서 1시간 2차 고정 후, 동일한 buffer로 30분 간격으로 3회 세척하였다. 그 후 30%, 50%, 70%, 90%, 95% ethyl alcohol로 30분 간격으로 탈수를 진행했고, 100% ethyl alcohol로 30분 간격으로 2회 탈수시켰다. 완전 탈수된 시료를 임계점 건조 후 Pt coating 과정 후 1~10 kv의 가속전압 조건하에서 LV-SEM으로 20×~2500× 배율로 관찰하였다. 특히 털의 배열, 표면 거칠기, 줄기와의 연결부 형태를 중점적으로 분석하였다.

### 2.3. 내부 밀도 분석

점착성 기근의 내부 조직과 밀도 분포는 micro-CT(Skyscan1273, Bruker)를 이용해 비파괴적으로 분석하였다. 모든 시료는 전처리없이 3~5개의 줄기에서 기근 부분을 절단하여 사용하였다. 촬영조건은 동일하게 전압은 70 kV, 전류는 114 uA, Camera pixel은 74.877 μm, rotation step은 0.300 °로 촬영하였다. 촬영한 이미지들은 DataViewer 1.7.0 (Bruker) 프로그램 통해 밀도를 분석하였다(Gargiulo et al., 2024). 밀도 값은 점착성 기근의 중심 위치의 단면 이미지에서 측정하였다. 밀도는 단위 부피당 질량을 나타내는 값이지만 본 실험에서는 직선을 그어 직선에 대한 밀도값을 8-bit grey level(0~255)로 얻었다. 직선은 줄기와 점착성 기근이 맞닿는 부분부터 점착성 기근 끝부분까지 그어 측정하였다. 이를 바탕으로 각 시료의 평균 조직 밀도(± 표준편차)와 최대 밀도(max density)를 비교하여 구조적 강도와 부착력의 상관성을 평가하였다.



Fig. 1. Adhesive aerial roots of climbing plants.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 외형적 형태 비교

세 덩굴식물의 접착성 기근은 외형적으로 뚜렷한 형태적 차이를 보였다. 아이비의 접착근은 줄기의 절간(inter-nodal region) 부위에서 관찰되었으며 접착근의 평균 길이는  $3.9 \pm 1.2$  mm이고 최대 길이는 5.3 mm로 관찰됐다. 단독 또는 무리로 형성되며, 주로 다발 형태로 형성되어 주로 수직 방향으로 배열되는 경향을 보였다(Fig. 1a). 이러한 다발형 구조는 접착 시 표면과의 접촉 면적을 극대화하여 부착력을 향상시키는 데 기여하는 것으로 판단된다. 반면, 백화등 접착근의 길이는 평균  $1.4 \pm 1.2$  mm이고 최대 길이는 4 mm로 측정됐다. 접착근의 형태는 비교적 조밀한 형태로 형성되어, 줄기 표면에 평행하게 뻗는 경향을 보였다(Fig. 1a). 이는 나무껍질이나 암석 사이에 파고들어 접착하기에 유리한 구조로 해석되었다(Tay et al., 2022). 스킨답서스의 기근은 세 종 중 가장 길고 굵은 형태를 보였으며, 각 절(node)에서 단독으로 발생하였다(Fig. 1a). 기근의 최대 길이는 90 mm, 평균 길이는  $39.2 \pm 39.4$  mm로 관찰되었으며 길이의 최댓값을 비교했을 때 스킨답서스의 기근 길이가 다른 두 종 길이의 약 10배 이상 길었다. 이러한 장선형 구조는 부착 기능 외에도 공중습도를 이용한 수분 흡수를 병행하기 위한 형태적 적응으로 해석된다(Rabbi et al., 2022). 스킨답서스의 기근은 표면 부착보다는 지지체를 따라 성장하면서 환경 수분을 효율적으로 획득하는 역할을 수행하는 것으로 보인다(Sheeran and Rasmussen, 2023).

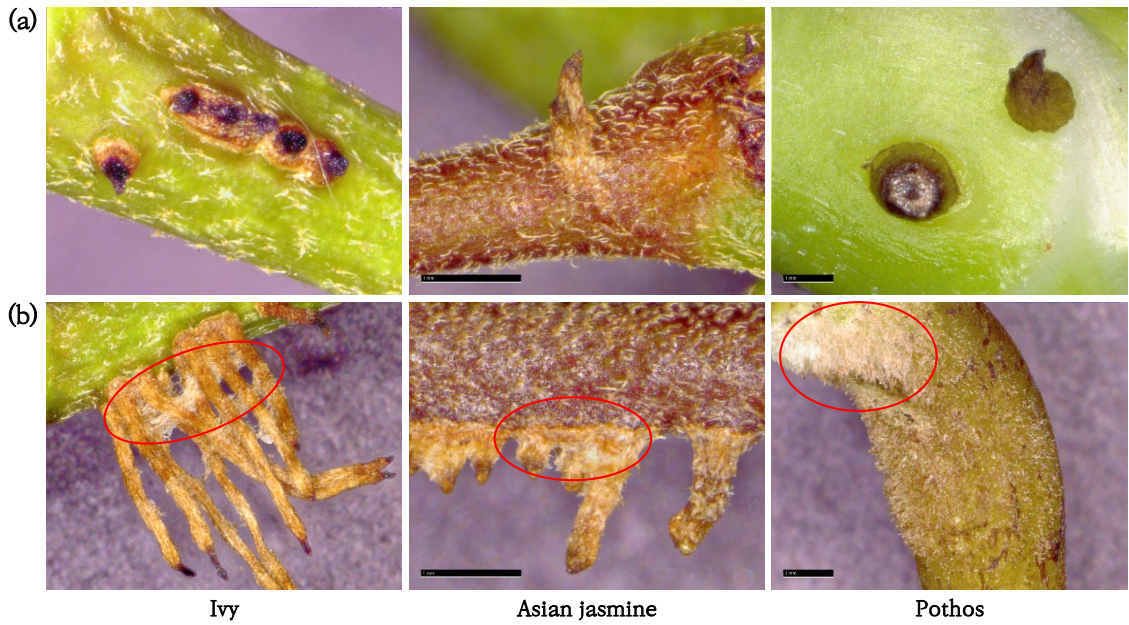
이와 같은 외형적 차이는 각 식물의 서식지 특성과

밀접하게 연관된 것으로 판단된다. 아이비는 건조한 벽면이나 암석 표면에 부착하기 때문에 높은 접착 강도가 요구되며, 백화등은 중간 습도의 착생 환경에서의 틈새에 파고 들어 부착하는 전략을 발달시켰다. 스킨답서스는 높은 습도의 환경에 적응하여 부착력과 함께 수분 흡수 효율을 증대시키는 형태를 띠고 있다. 이는 접착성 기근이 각 종의 환경조건에 적합한 구조적 기능을 수행하고 있음을 확인할 수 있다.

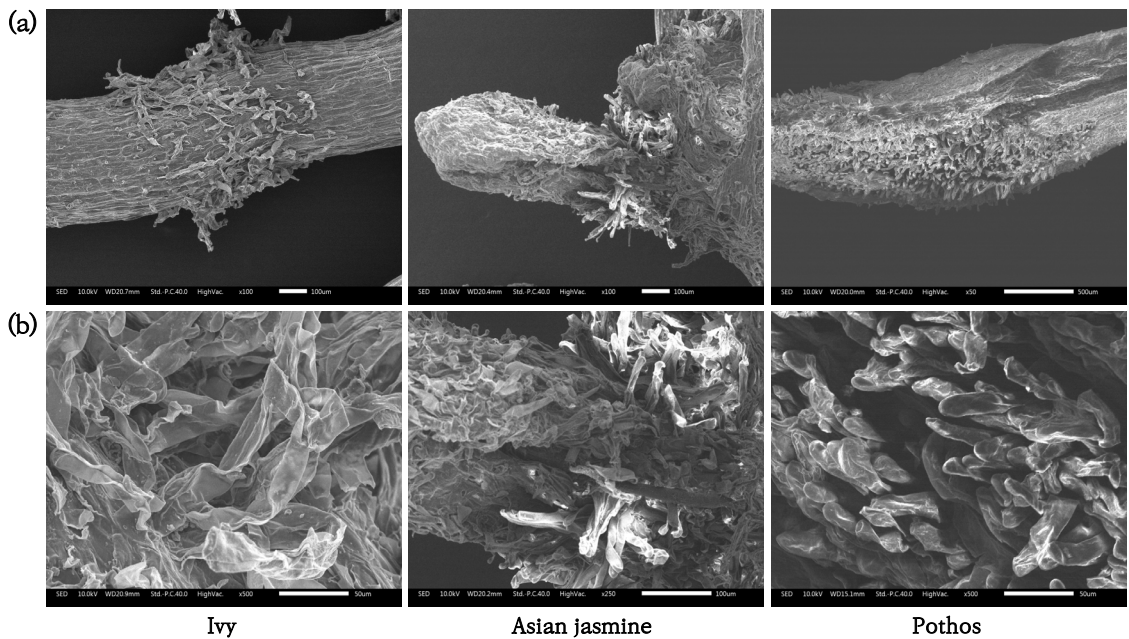
#### 3.2. 미세구조 및 표면 털 특성

스마트 고해상도 실체 현미경을 통해 접착성 기근의 초기 형태와 표면의 털(root hair)구조를 관찰하였다. 초기형태의 경우 아이비와 백화등, 스킨답서스 모두 뾰족한 돌기 형태로 관찰되었다(Fig. 2a). 아이비 접착근의 털은 불규칙하게 분포하며 인접한 접착근 간에 털이 상호 연결되는 특징이 관찰되었다(Fig. 2b). 백화등의 접착근에서 털 구조가 주로 줄기와 연결된 기저부에 집중되는 형태를 보였다. 스킨답서스의 기근은 털이 한쪽 면에만 집중되어 있으며, 미세하고 부드러운 솜털 형태로 관찰되었다.

LV-SEM 분석에서는 접착성 기근의 털 구조를 전체적인 분포와 함께 세부 조직적 특성을 관찰하였다. 아이비의 접착근의 털 구조는 접착근의 둘레를 따라 원형 형태로 형성된 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 3a). 백화등의 경우, 접착근의 털이 무리 형태로 모여 있고 바깥 방향으로 길게 뻗는 특징을 보였다. 스킨답서스의 기근에서는 스마트 고해상도 실체 현미경 결과와 같이 촘촘하게 박힌 털 구조를 관찰하였다. 조직적 측면에서 미세털 구조를 확대하여 관찰한 결과, 아이비의 접착근 털은 납



**Fig. 2.** Macroscopic morphology of adhesive aerial roots. (a) root hair structure of adhesive aerial roots, (b) early morphology of adhesive aerial roots. Scale bar: 1mm.



**Fig. 3.** LV-SEM images showing external morphology of root hairs on adhesive aerial roots at (a) low and (b) high magnification. Scale bars from left to right: (a) 100  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ ; (b) 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ .

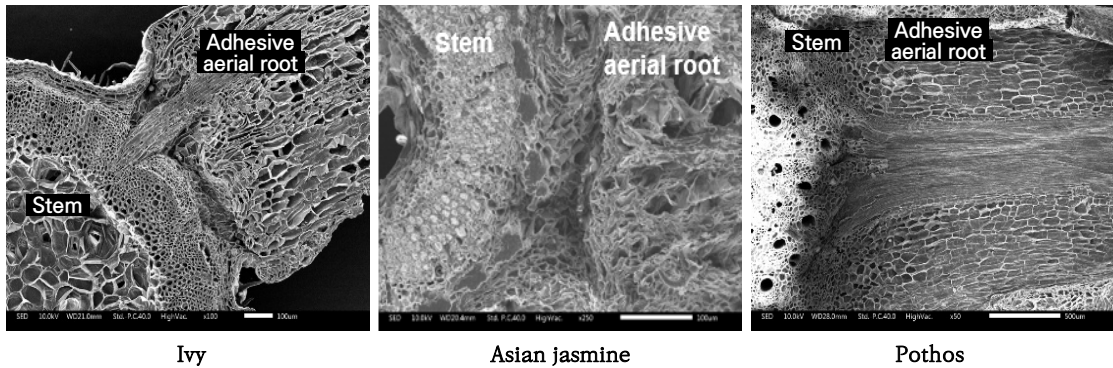


Fig. 4. LV-SEM image showing a cross-section of the junction between the stem and adhesive aerial root. Scale bars from left to right: 100  $\mu$ m, 100  $\mu$ m, 500  $\mu$ m.

작하게 늘린 형태로 불규칙하게 꼬이고 휘어 있는 형태였다(Fig. 3b). 백화등 접착근 털의 조직 형태는 바깥쪽 방향으로 길게 뻗은 형태를 띄며 약간 꼬인 형태로 접착근 바깥쪽으로 뻗은 형태로 관찰되었다. 스킨답서스의 털 구조를 500 배율로 확대한 결과, 상대적으로 규칙적인 형태를 보였으며 아이비와 백화등에 비해 약간의 뒤틀림과 꼬임만이 관찰되었다.

아이비에서 관찰된 상호 연결형 털 구조는 부착 시 접착근 간 결속력을 높이고 표면 접촉 면적을 넓히는 역할을 하는 것으로 판단된다. 털 구조의 미세한 불규칙성은 표면 거칠기를 증가시켜 접착력을 강화하는데 기여할 것으로 예상된다. 기저부 부분에 위치한 백화등 접착근의 미세털 구조는 약간의 꼬임과 뻗은 형태로, 나무껍질이나 암석 사이에 파고들었을 때 접착 면적을 높이고 바깥부분에서의 접착에 유리할 것으로 예상된다(Yim and Kim, 2002). 스킨답서스의 기근 털 구조는 수분 흡수의 기능에 유리한 표면 확장 기능을 수행하며, 높은 흡습성 특성과 함께 부드러운 표면에 파고들기 적합한 구조로 해석된다. 이러한 결과로, 접착성 기근의 털이 갖는 형태적 구조의 불규칙성이 클수록 접착력을 더 강화하는 것으로 보인다. 종합적으로 접착성 기근의 털은 그 형태적 구조, 배열 위치, 불규칙성에 따라 서식 환경에 최적화된 부착 기능을 수행하는 것으로 보인다.

### 3.3. 내부 조직 및 밀도 특성

LV-SEM 분석을 통해 접착성 기근의 미세구조를 관찰하였다. 동일한 조건(70 kV, 114  $\mu$ A)에서 촬영한

micro-CT 분석을 통해 접착성 기근의 밀도를 grey level (8-bit, 0~255)로 측정하였다. 식물 3종의 접착성 기근은 밀도와 공극 구조에서 뚜렷한 차이를 보였다. 아이비 접착근의 평균 밀도는  $178.0 \pm 17.8$ 이고 최대 밀도는 210으로 3종 중 가장 높은 값을 나타냈으며, 내부 조직은 균질하게 분포하였다(Fig. 4). 이는 접착근이 외부 충격에 대한 구조적 강도를 유지하면서도, 부착 시 외력 분산을 위한 견고한 지지 구조를 형성하고 있음을 의미한다. 백화등은 아이비에 비해 평균  $99.1 \pm 19.1$ 로 낮은 밀도를 보였으나 내부 조직은 가장 치밀하고 미세한 공극을 포함하는 특성을 나타냈다. 스킨답서스는 평균  $79.2 \pm 2.5$ 로 세 종 중 가장 낮은 밀도를 보였으며, 조직 내 다공성이 두드러지게 발달해 있었다. 이러한 구조는 수분 흡수를 위한 공간 확보와 동시에, 외부 자극에 따라 유연하게 변형될 수 있는 탄성 구조를 제공한다. 따라서 스킨답서스의 기근은 흡착과 부착 기능을 동시에 수행하는 데 적합한 형태로 판단된다.

밀도 차이는 각 식물이 처한 부착 환경과 직접적으로 관련된 것으로 해석되며 밀도가 클수록 강도가 높아져 접착력에 유리할 것으로 보인다. Huang et al.(2022)에 따르면 가교결합 밀도가 증가할수록 재료의 강성과 강도가 증가하지만 유연성은 감소한다. 반면, 아이비 접착근의 접착력은 3.4 MPa, 최대 변형률은 34%로 높은 접착능력과 함께 높은 변형률을 가진 것으로 보고된 바 있다(Melzer et al., 2012). 아이비의 경우 밀도가 커서 강도가 높고 접착력이 증가하는 것으로 보인다. 백화등과 스킨답서스의 경우에는 접착근에 대한 연구 자

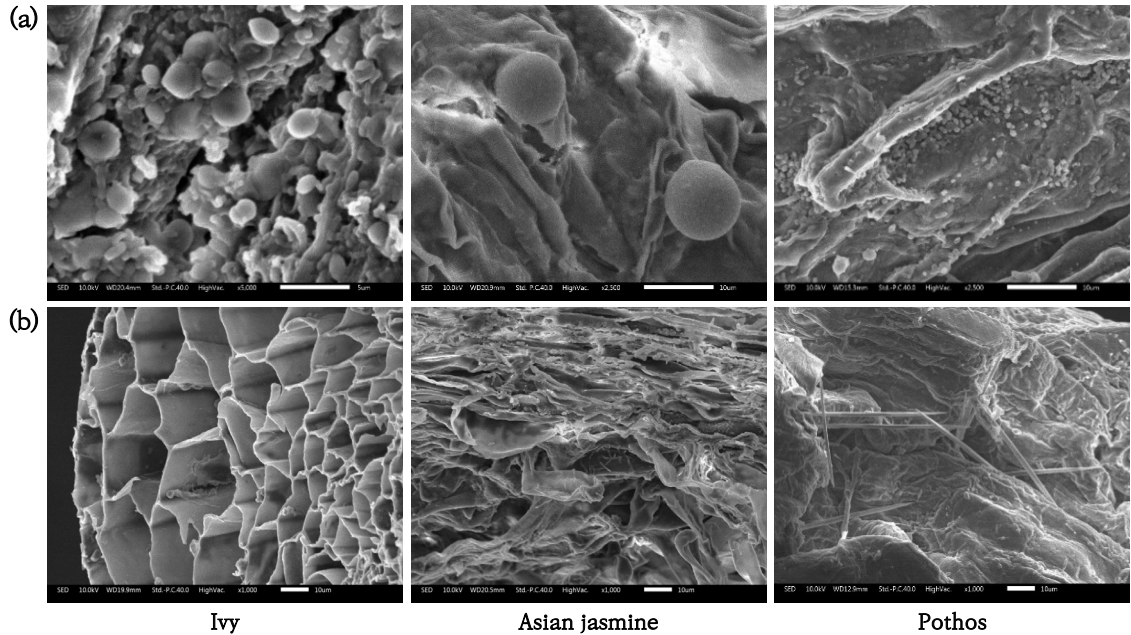


Fig. 5. Distinctive structures in internal(a) and external(b) anatomy of adhesive aerial roots. Scale bars from left to right: (a) 5  $\mu$ m, 10  $\mu$ m, 10  $\mu$ m.; (b) 10  $\mu$ m, 10  $\mu$ m, 10  $\mu$ m.

체가 부족하여 밀도와 접착력과의 연관성에 대해 밀도와 LV-SEM 결과를 바탕으로 유추해볼 수 있다. 아이비와 백화등의 접착근은 높은 밀도로 건조한 환경에서 강력한 부착을 유지하는 데 유리한 구조이다. 스킨답서스의 기근은 습윤 환경에서 유연성을 확보하고 표면 적응성을 높이기 위해 낮은 밀도를 가진다. 이러한 구조적 차이는 환경 조건에 따른 물리적 최적화의 결과로 볼 수 있다.

또한, 아이비, 백화등, 스킨답서스에서 특이한 구조가 관찰되었다. 아이비와 백화등, 스킨답서스 접착성 기근의 내부 구조에서는 분비물로 추정되는 둥근 형태의 구조가 발견되었다(Fig. 5a). 외부적인 구조에서는 아이비의 다각형의 결이 확인되었으며, 백화등은 여러 겹의 결이, 스킨답서스에서는 뾰족한 바늘형 조직이 관찰되었다(Fig. 5b). 아이비와 백화등, 스킨답서스 기근의 내부에서 관찰된 동그란 구조는 세포에서 분비된 물질일 가능성이 있는 것으로 판단되었다(Park et al., 2007).

#### 4. 결론

본 연구는 아이비(*Hedera helix*), 백화등(*Trachelospermum asiaticum*), 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)의 접착성 기근 구조를 비교 분석하여 덩굴식물의 부착 메커니즘을 형태학적 관점에서 규명하였다. 아이비는 높은 조직 밀도와 다발형태의 구조, 미세 털 구조 및 접착성 분비층을 통한 물리적, 화학적 부착의 특징을 보였다. 백화등은 표면의 미세 틈새에 파고들어 접착하는 구조적 특성을 보였으며, 스킨답서스는 흡수 기능에 유리한 털 구조와 외부자극에 따라 변형 가능한 다공성 조직을 특징으로 보였다. 이러한 결과는 접착성 기근의 구조가 서식 환경에 따라 적응한 시스템으로 형태와 접착력에 차이를 보여준다. 또한, 각 식물의 부착 전략은 생분해성 접착소재나 친환경 표면 코팅 기술 등 환경공학적 응용에 활용 가능한 생태모방형 설계 원리를 제공할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구성과는 기후에너지환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2025-18).

REFERENCES

- Burris, J. N., Lenaghan, S. C., Stewart, C. N., 2018, Climbing plants: Attachment adaptations and bioinspired innovations, *Plant Cell Rep.*, 37, 565-574.
- Gargiulo, L., Mele, G., Izzo, L. G., Romano, L. E., Aronne, G., 2024, Local mapping of root orientation traits by X-ray micro-CT and 3d image analysis: A Study case on carrot seedlings grown in simulated vs real weightlessness, *Plant methods*, 20(1), 150.
- Huang, J., Fu, P., Li, W., Xiao, L., Chen, J., Nie, X., 2022, Influence of crosslinking density on the mechanical and thermal properties of plant oil-based epoxy resin, *RSC Adv.*, 12(36), 23048-23056.
- Lee, K., 2016, *Plant morphology*, 3rd ed., Life Science Publishing, Seoul, Korea.
- Lee, M. H., Kim, I. S., 2011, Characteristics of adhesive disks in *Parthenocissus tricuspidata* during attachment, *Applied Microscopy*, 41(2), 139-145.
- Liu, Y., Gao, M., 2022, A Coupled transport-adhesion mechanism responsible for the attachment of adventitious root hairs of climbing plants to the surrounding surface, *Int. J. Plant Biol.*, 13(4), 625-633.
- Melzer, B., Steinbrecher, T., Seidel, R., Kraft, O., Schwaiger, R., Speck, T., 2010, The attachment strategy of English ivy: A Complex mechanism acting on several hierarchical levels, *J. R. Soc. Interface*, 7(50), 1383-138.
- Park, H. D., Jung, B. G., Bang, J. U., Ko, S. C., Park, S. J., 2007, *Core concepts in plant morphology*, World Science, Seoul, Korea.
- Rabbi, S. M., Warren, C. R., Macdonald, C., Trethowan, R. M., Young, I. M., 2022, Soil-root interaction in the rhizosheath regulates the water uptake of wheat, *Rhizosphere*, 21, 100462.
- Sheeran, L., Rasmussen, A., 2023, Aerial roots elevate indoor plant health: Physiological and morphological responses of three high-humidity adapted Araceae species to indoor humidity levels, *Plant Cell Environ.*, 46(6), 1873 -1884.
- Tay, J. Y., Kovalev, A., Zotz, G., Einzmann, H. J., Gorb, S. N., 2022, Holding on or falling off: The attachment mechanism of epiphytic *Anthurium obtusum* changes with substrate roughness, *Am. J. Bot.*, 109(6), 874-886.
- Woo, K. M., Yang, Y. O., 2012, *Stories of Jeju: the world's environmental treasure island*, Jeju Special Self-Governing Province & Jeju Development Institute, 79-6500000-000186-01, Jeju, Korea.
- Yang, X., Deng, W., 2017, Morphological and structural characterization of the attachment system in aerial roots of *Syngonium podophyllum*, *Planta*, 245(3), 507-521.
- Yim, J. E., Kim, I. S., 2002, Morphological and cellular characteristics of aerial roots in the epiphytic American ivy (*Parthenocissus* sp.), *Applied Microscopy*, 32(4), 329-337.
- Melzer, B., Seidel, R., Steinbrecher, T., Speck, T., 2012, Structure, attachment properties, and ecological importance of the attachment system of English ivy (*Hedera helix*), *J. Exp. Bot.*, 63(1), 191-201.

- 
- Senior Researcher. Haejin Bae  
Ecological Technology Research Team, National Institute of Ecology  
hjbae@nie.re.kr
  - Researcher. Shinyu Baek  
Ecological Technology Research Team, National Institute of Ecology  
shinyu@nie.re.kr