

연꽃식물 조직의 표피 특성과 연잎효과

김 인 선*

계명대학교 자연과학대학 생물학과

Epidermal Features of the *Nelumbo nucifera* Tissues and Lotus Effect

InSun Kim*

Biology Department, College of Natural Sciences, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received June 12, 2012; Revised June 25, 2012; Accepted June 26, 2012)

ABSTRACT

The cell surface sculpture of the plant epidermis has received great interest recently. It has also been an active area of research, as the biological microstructures of the surface, such as papillae and waxes, exhibit several unique properties, including self-cleaning character; namely the “Lotus effect” first described in the leaves of the lotus, *Nelumbo nucifera*. The Lotus effect is the phenomenon in which the super-hydrophobic and water-repellent nature of lotus leaves allow water drops to run off easily on the surface in a rolling and sliding motion thereby facilitating the removal of dirt particles. It is well-known that surface roughness on the micro- and nanoscale is a primary characteristic allowing for the Lotus effect. This effect is common among plants and is of great technological importance, since it can be applied industrially in numerous fields. In the present study, *Nelumbo nucifera* leaf and stem epidermal surfaces have been examined with a focus on the features of papillae and wax crystalloids. Both young and mature *Nelumbo nucifera* leaf epidermis demonstrated the Lotus effect on their entire epidermal surface. The central area of the upper epidermis, in particular, formed extremely papillose surfaces, with an additional wax layer, enabling greater water repellency. Despite the presence of wax crystalloids, epidermal surfaces of the lower leaf and stem lacking papillae, were much more easily wetted.

Keywords : Epidermis, *Nelumbo nucifera*, Papillae, Tissue, Wax crystalloids

서 론

표피조직(epidermis)은 식물체 최외층의 살아 있는 조직으로 환경과 직접 접하는 특수한 위치로 인해 형태적, 기능적으로 다른 조직 세포들보다 폭넓은 가스성을 갖는다(Lee, 2004; Graham et al., 2006). 이러한 표피조직은 물과 무기물질 흡수, 각피 분비, 보호 및 방어, 가스교환 등의 여러 가지 기능을 수행하는 중요한 조직이다. 특히, 공기와 접하는 표

피세포의 바깥쪽 세포벽 각피층(cuticle)이 지방성 물질인 각피소(cutin)로 피복되어 있어 표피조직이 포식자들로부터의 공격에서 보호받거나 방어기능을 수행할 수 있게 된다(Lee, 2004). 이와 더불어 대부분의 식물체 각피층 위에는 다양한 형태의 모용이나 소수성 왁스(wax)가 발달하여 표피조직의 2차적인 기능을 더 해준다.

표피조직 위에 형성되는 왁스의 발달 여부는 식물체가 서식하는 환경에 많은 영향을 받는데, 건조한 지역에 서식하는 경우 특이한 형태의 왁스가 두꺼운 층으로 발달하여 수분증

* Correspondence should be addressed to Dr. InSun Kim, Biology Department, College of Natural Sciences, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea. Ph.: (053) 580-5305, Fax: (053) 580-5305, E-mail: botany@kmu.ac.kr

발을 더욱 효율적으로 방지할 수 있다(Lee, 2004; Koch et al., 2009). 수생식물도 표피조직 위에 왁스를 형성하나 식물체가 수중에 부유하는 특성으로 인하여 수분증발이 신속하게 일어날 수 있도록 비교적 얇게 발달한다. 이들 왁스는 식물 종, 서식환경, 성장단계 또는 식물체 부위에 따라 다르게 발달할 수 있으며, 표피조직 표면이 매끄럽거나 거친 양상 등 다양한 표면 형태를 나타내는데 중요한 요인이 된다. 왁스와 더불어 표피조직 표면의 형태를 결정짓는 또다른 중요한 요인은 표피세포에서 기원하는 돌기성 구조인 모용과 미세돌기(papillae)이다. 모용과 미세돌기들은 표피의 소수성에 크게 작용하는데, 특히 미세한 돌기 표면 위에 왁스 결정체가 축적되면 고도의 초소수성(superhydrophobicity) 특성을 갖게 된다(Barthlott & Neinhuis, 1997; Marmur, 2004; Cha et al., 2009). 이러한 돌기와 왁스에 의해 고도의 초소수성을 갖는 표피조직의 연잎효과는 식물체 표피조직 표면의 발수(water repellency) 및 자기정화(self-cleaning) 특성을 조사한 연구에서 처음 규명되었으며(Barthlott & Neinhuis, 1997), 연잎을 비롯한 여러 식물의 잎(Barthlott & Neinhuis, 1997; Neinhuis & Barthlott, 1997; Nun et al., 2002; Wagner et al., 2003; Burton & Bhushan, 2006; Koch et al., 2009)과 꽃잎(Feng et al., 2008, 2009, 2010; Bhushan & Her, 2010; Dawood et al., 2011) 등의 표피조직에서 보고되고 있다.

표피 표면의 소수성은 물과 접촉하는 경계면의 표면장력이 커서 물과 접촉하는 면적을 작게 할 때 나타난다. 소수성은 물방울과 표면이 접촉하는 접촉각(contact angle)으로 표시하며, 표면의 성질을 결정하는데 중요한 요인이 된다(Marmur, 2004; Otten & Herminghaus, 2004; Guo & Liu, 2007; Gao & McCarthy, 2008; Spori et al., 2008; Bhushan, 2012). 접촉각의 각도가 90° 이상은 소수성, 110° 이상은 초소수성, 140° 이상이 먼 초소수성이 나타나며(Neinhuis & Barthlott, 1997; Nun et al., 2002; Kang, 2006), 연잎 표면의 접촉각은 $149 \sim 160^\circ$ 로 조사된 바 있다(Muller et al., 2007). 표면의 높은 접촉각으로 초소수성의 연잎 표면에서는 떨어진 물이 흡수되지 않고 방울을 형성하여 빠른 속도로 표면의 오염물질과 함께 굴러 떨어지게 되는 것이다(Feng et al., 2009).

연꽃은 다년초로서 진흙이나 습지와 같이 잎이 오염되기 쉬운 환경에서 자라나, 넓은 잎 표면이 항상 깨끗한 상태를 유지하고 있다. 연잎 표면에서 나타나는 이러한 자정효과를 연잎효과(Lotus effect)라 하며, 이는 표피조직에 발달하는 미세구조들이 중요한 요소가 된다. 물이 잎 표면에 떨어지면 내부로 스며들지 않고 방울이 되어 흘러 내려갈 때 표면에 있던 먼지나 이물질을 함께 끌고 떨어지게 된다. 이러한 연잎효과에 대한 연구는 생물학적인 영역에서보다 물리화학적 응용 또는 생체모방공학 등의 영역에서 최근까지 더 활발하고 광범위하게 연구되고 있다(see Bhushan, 2012). 그

러나 생물학적인 측면에서 연잎을 성장단계별로 연구하거나 잎 표피조직을 부위별로 비교 조사한 연구는 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 연꽃식물의 잎과 줄기를 대상으로 성장단계별로 나누어 표피조직 표면의 미세구조적 특성과 연잎효과를 비교 연구하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

본 연구에서 사용된 연꽃(*Nelumbo nucifera*)은 2010~2011년 대구광역시 및 경상북도 경산시 인근 지역의 연꽃 자생지에서 채취되어 실험실로 옮겨진 직후 아래의 방법으로 처리되었다. 다양한 크기의 잎은 직경 약 $7 \sim 9$ cm의 어린잎에서부터 50 cm 이상의 성숙한 잎에 이르기까지 성장단계별로 실험에 사용되었다. 줄기는 직경에 따라 어린 줄기(직경 $2 \sim 3$ mm)와 성숙한 줄기($12 \sim 15$ mm)로 구분되어 실험되었다.

2. 실험 방법

1) Scanning Electron Microscopy (SEM)

연잎의 표피조직을 약 $2 \sim 5$ mm² 크기로 세절하여 2~3% glutaraldehyde 용액으로 3시간 전고정한 후, 0.1 M sodium phosphate buffer (pH 6.8) 용액으로 15분씩 3회 세척하였다. 시료를 2% aqueous OsO₄ (osmium tetroxide) 용액을 사용하여 4°C 에서 24시간 후고정하여 동일 buffer로 15분에 걸쳐 3회씩 세척하였다. 이후 graded acetone series (10~100%)로 15분씩 3회 탈수하였다. 시료는 liquid CO에 의해 Emitech K-850에 의한 임계점 건조(critical point drying, CPD) 과정을 거쳐 건조시킨 뒤 알루미늄 stub 위에 장착하여 Emitech K-550X ion sputter에서 20 nm 백금의 금속피막을 입혔다. 이후 시료는 한국기초과학지원연구원 대구센터 소재 Hitachi S-4200 SEM에서 15 kV로 연구하였고, 촬영된 image data는 image processing되어 비교 분석되었다.

2) Drying Procedures

기계 내 건조와 자연 공기 건조: 절단되지 않은 연잎 조직을 건조기(drying oven) 내에서 80°C 의 조건으로 10일 이상 처리하여 완전히 건조되면 약 2×2 mm² (가로×세로) 크기로 세절하였다. 이후 위의 SEM 방법과 동일하게 알루미늄 stub 위에 장착하여 ion sputter에서 20 nm 백금으로 금속피막을 입혔다. 금속피막 처리된 시료는 한국기초과학지원연구원 대구센터 소재 Hitachi S-4200 SEM에서 15 kV로 분석된 후, 촬영된 image data를 image processing하여 비교 연구하였다. 공기 건조방법은 상온(35°C 이상)에서 2주일 이상 건조시킨 엽육조직을 2×2 mm² 면적으로 절단한 후 백금 코

팅을 하여 Hitachi S-4200 주사전자현미경으로 관찰하였다.

3) 연잎효과 측정 방법

SEM 실험을 위한 조직채취 (tissue sampling)에 앞서 자생지에서 연꽃 식물체 표면의 연잎효과를 조사하였다. 연잎은 어린 잎과 성숙한 잎 상피조직 및 하피조직의 엽신과 중앙 부위에 5 mL 일회용 피펫을 사용하여 물방울을 연속적으로 떨어뜨려 표피조직 표면 위에 잔존하는 상태를 촬영 및 기록하였다. 어린 줄기 및 성숙한 줄기의 향측면 (adacial surface) 표피조직 표면에 위와 동일하게 물방울을 떨어뜨려 내부에 스며들거나 퍼지는 정도 등의 잔존여부를 비교 조사하였다.

표피조직 표면에 발달하는 미세돌기들의 분포양상은 각 조직 및 부위별로 5~10장의 SEM negative film을 image processing하여 1 mm² 단위면적당 형성된 돌기 개수로 환산하여 산출하였다.

결 과

1. 형태적 특징 (Morphological Characteristics)

수생환경에 서식하는 연꽃은 물방울이 잎의 표면에서 스며들지 않고 굴러 떨어지면서 표면을 깨끗하게 유지하는 연잎효과 (Lotus Effect)를 표피조직에 따라 다음과 같이 나타내었다. 자생지에서 연꽃 식물체 표면의 자연적인 연잎효과를 조사한 결과, 어리거나 성숙한 잎 윗면에 물을 떨어뜨리면 물방울은 상피조직 내부로 스며들지 않고 엽신 (leaf blade) 경사면을 따라 표면에서 굴러 떨어졌다 (Fig. 1). 어린 잎에 떨어뜨린 물방울에서도 성숙한 잎에서와 같이 표피조직 표면에 스며들어가거나 방울로 남지 않고 엽신을 따라 바로 흘러내리는 연잎효과가 확인되었다. 하피조직에서는 어린잎이나 성숙한 잎 어느 경우에도 연잎효과가 나타나지 않았다. 반면, 줄기의 표면에서는 잎 표면에서와는 달리 물방울이 표면에 형성되기는 하였으나, 퍼진 형태로 남아 있었다 (Fig. 2). 또한 잎에서와 같이 물방울이 굴러 떨어지는 않고, 일부 물방울 흔적이 줄기 표면에 계속 잔류하였다.

이들 조직을 자연적 공기건조, 기계 내 건조, SEM 실험법으로 아세톤 유기용매처리한 뒤 비교 연구한 어린 잎 및 성숙한 잎, 그리고 줄기 표피조직에서의 표피세포, 표면 미세구조들의 구조적 특성은 다음과 같다. 잎은 엽신 중앙에 발달하는 원형의 두꺼운 회백색 조직을 중앙 부위로 하고, 그 외의 부분을 엽신으로 구분하였다. 건조된 조직은 자연적인 공기건조나 기계 내 건조시킨 경우 형태나 구조적으로 크게 다른 양상을 보이지 않아 설명되는 아래의 부위별 결과는 달리 언급이 없는 한 자연적인 공기건조에 의한 표피조직 표면의 특징을 기재하였다.

2. 잎 표피조직의 표면 특성

1) 성숙한 잎

엽신 상피조직 표면에는 미세돌기가 조밀하게 분포하여 1 mm² 단위면적당 엽신에는 2300~3000개, 중앙 부위에는 더욱 높은 밀도로 3500개 이상 발달하였다 (Fig. 3). 이들 미세돌기 (papillae)는 약 15×12 μm (높이×폭)의 원뿔형으로 미세돌기를 비롯한 모든 표피조직 표면은 미세한 왁스결정체 (wax crystalloids)에 의해 피복되었다 (Fig. 4). 왁스결정체는 약 600~900 nm의 미세한 원통형 구조로 불규칙하게 분지하였으며, 특히 미세돌기 표면을 여러 층으로 피복하였다. 아세톤 유기용매 처리 후 임계점건조를 거친 경우 미세돌기들은 수축되었고, 왁스결정체는 모두 용해되어 관찰되지 않았다. 반면 회백색의 하피조직에는 미세돌기가 발달하지 않고, 표면에는 왁스결정체만 분포하였다 (Fig. 5). 그러나 유기용매 처리한 하피조직의 왁스결정체는 모두 용해되어 표면은 매끄러운 양상으로 변형되었고 (Fig. 5 inset), 이러한 현상은 상피조직의 미세돌기에서도 관찰되었다 (Fig. 6).

연잎 표피조직의 중앙부위는 저배율 상에서는 둥근 형태로 관찰되나, 실제로는 중앙부위 주변의 엽신에 비하여 더 두껍게 형성되어 있다 (Fig. 7). 기공의 경우 중앙부위의 기공은 열려 있는 반면 엽신의 기공은 닫혀 있었다. 또한 많은 미세돌기가 중앙의 표피를 덮고 있으며, 미세돌기 위를 왁스결정체가 두껍게 피복하였다 (Fig. 8). 이들 중앙 부위의 세포들은 여러 층으로 형성되며, 인접한 엽신 부위와는 매우 불규칙한 경계를 이루며 발달하였다 (Fig. 9). 중앙 부위의 세포들 또한 엽신의 표피조직과 같이 아세톤처리 시 미세돌기 표면이 수축되고, 왁스결정체는 용해되어 전혀 관찰되지 않았다 (Fig. 10).

2) 어린 잎

생체시료 중앙부위의 어린조직 표피 또한 원형의 형태를 이루나, 성숙한 잎에 비해 그 크기가 작으며, 얇은 층을 이루었다. 이들 표피조직 위에는 미세돌기와 왁스결정체가 피복하였고 엽신과 불규칙한 경계를 이루나, 성숙한 잎처럼 여러 층을 형성하지는 않았다. 이를 통해 잎이 성숙해 가면서 중앙 부위가 발달하며 단단해지는 것이 확인되었다. 또한 표피의 기공은 열려 있는 반면, 엽신의 기공은 닫혀 있었다. 아세톤처리 결과 성숙한 잎과 같이 왁스결정체가 용해되어 표면에서는 전혀 관찰되지 않았다. 엽신의 상피표피에는 많은 미세돌기와 왁스결정체가 형성되는데, 특히 미세돌기는 성숙한 잎에 비해 더 많이 분포하여 1 mm² 단위면적당 2900~3300여개가 발달하였다.

3. 줄기 표피조직의 표면 특성

성숙한 줄기의 표피조직 표면에는 미세돌기들이 형성되지 않으며, 약 800~1000 nm 크기의 왁스결정체들만이 발달

Table 1. Lotus effect and features of the papillae and wax crystalloids in *N. nucifera*.

Tissue	Character	Papillae	Wax crystalloids	Lotus effect
Leaf	Center			
	Young	+	+	+
	Mature	+	+	+
	Blade			
	Young u.e*	+	+	+
	Mature l.e*	-	-	-
Stem	Young	+	+	+
	Mature	-	-	-
	Young	-	+	-
	Mature	-	+	-

+/- = presence/absence, u.e* = upper epidermis, l.e* = lower epidermis

하였다(Figs. 11, 12). 어린 줄기에서도 성숙한 줄기의 표피 표면에서와 같이 왁스결정체가 표피조직 표면을 덮고 있는데, 매우 높은 밀도로 축적되어 줄기표면이 노출되지 않게 전체 표면을 피복하였다(Fig. 13). 아세톤으로 처리된 줄기의 표면은 왁스결정체가 용해되는 것으로 나타났는데, 특히 어린 줄기 표면에 발달한 왁스결정체들은 불규칙하게 층을 이루며 분지하였다(Fig. 14). 본 연구에서 조사된 잎과 줄기 표피조직 표면에 발달하는 미세돌기 및 왁스결정체의 분포와 연잎효과 특성은 Table 1에 요약되었다.

고 찰

식물체의 내부 조직을 보호하고 지지하는 표피조직(epidermis)은 조밀한 표피세포들로 구성된다. 표피조직은 환경과 접하는 세포벽 외부 표면에 각피층(cuticle)이 폴리에스테르 중합체 성분의 각피소(cutin)를 분비하여(Koch et al., 2009) 수분손실 감소, 포식자로부터 보호, 방어기능 등 다양한 기능을 수행할 수 있다(Graham et al., 2006). 이러한 표피 표면에는 기공, 근모 등 여러 특수화된 세포들이 분화하고, 종에 따라 함께 표피표면에는 모용과 같은 돌기나 미세돌기(papillae)가 형성될 수 있다. 표피세포 기원 미세돌기가 나노미터 수준의 크기로 형성되면 나노돌기라고 불리는데, 왁스 함께 다양한 형태의 표면을 형성하여 표피조직의 소수성(hydrophobicity)에 큰 영향을 미친다(Gould, 2003; Burton & Bhushan, 2006). 특히, 미세돌기 표면에 왁스가 발달하면 그 표면은 초소수성(superhydrophobicity)의 특수한 성질을 갖게 된다. 이러한 고도의 발수력(water repellency)을 갖는 식물은 연꽃으로 잎 표면은 항상 깨끗한 상태를 유지하고 있다. 이러한 특징은 같은 연꽃에서 인접해 자라는 수련 등 다른 수생식물에서는 전혀 나타나지 않는 현상이다.

생물체 표피 또는 물체 표면의 소수성은 물과 접촉하는 경계면의 표면장력이 커서 물과 접촉하는 이들의 면적이 작

게 될 때 형성된다. 소수성은 물방울과 표면의 접촉각으로 나타내는데, 일반적으로 표면 특성을 결정짓는데 매우 큰 영향을 미친다(Marmur, 2004; Otten & Herminghaus, 2004; Guo & Liu, 2007; Gao & McCarthy, 2008; Spori et al., 2008; Bhushan, 2012). 접촉각의 각도가 90° 이상은 소수성, 110° 이상은 초소수성, 140° 이상이 될 때 초소수성은 확연히 나타난다(Neinhuis & Barthlott, 1997; Nun et al., 2002; Kang, 2006). 연잎 표면의 접촉각은 149~160° (Muller et al., 2007)로 그 표면은 초소수성의 성질을 갖게 되어 물은 흡수되지 않고 물방울을 형성하여 약 10 mm/sec 속도로 표피의 오염물질과 함께 떨어지게 된다(Feng et al., 2009). 표면의 초소수성은 미세돌기와 소수성 왁스의 발달과 직접적인 관련이 있는 것으로 알려져 있는데(Burton & Bhushan, 2006), 이러한 특징은 본 연구의 연꽃 식물체 잎의 상피 및 하피조직, 그리고 줄기의 표피 표면에서도 확인되었다(Table 1).

연잎효과를 나타내지 않는 잎의 하피와 줄기 표면 위 물방울은 표면장력이 낮아 표면을 따라 흘러내렸는데, 이들이 표면적이 적은 오염물질의 위치를 변하게 하여 물방울을 따라 함께 흘러내리지는 않게 되는 것으로 생각된다. 반면 미세돌기와 왁스가 발달하고 접촉각이 크게 되어 초소수성 상태가 되게 표면 위의 물방울은 표면구조 내 공기에 의하여 표면 위 떠있는 독특한 구형의 상태가 된다(Gao & McCarthy, 2008; Cha et al., 2009). 물방울 하강 시 미세구조들에 의해 표면적이 극도로 축소되어 오염물질과 물방울의 접촉면이 커져 이들 오염물질이 물방울의 표면에 붙게 되고 물방울과 함께 경사면을 따라 굴러 떨어지는 것으로 밝혀졌다(Barthlott & Neinhuis, 1997; Cha et al., 2009).

연잎효과는 많은 식물 중(Neinhuis & Barthlott, 1997)을 비롯하여 곤충의 날개(Kang et al., 2006; Feng et al., 2008; Xia & Jiang, 2008) 표면에서도 발견되며, 유형 또한 다양한 것으로 보고되어 있다(Guo & Liu, 2007). 이들 연잎효과에 대한 표면구조 연구는 물리화학적, 공학적 영역에서 활발히 수행되고 있으나(Wagner et al., 2003; Fürstener et al., 2005; Forbes, 2008; Karthick & Maheshwari, 2008; Feng et al., 2009; Shafiel & Alpas, 2009; Cha et al., 2010; Shen et al., 2010), 생물학적 연구는 미진한 상태로 남아 있어 본 연구에서는 연잎의 성장단계별, 다양한 부위별 표면구조를 비교하였다. 연구에서 사용된 연잎은 각각 SEM 방법의 아세톤 유기용매 처리, 기계 내 건조, 공기건조를 실시하였다. 일반적인 SEM기법에서의 아세톤 처리는 연잎표피의 왁스층을 용해하여 왁스결정체를 관찰하기 어렵다(Ensikat & Barthlott, 1993; Peacock et al., 1998). 그러나 이 방법은 재배 포도의 표면에 오염물질이 쌓이는 단점을 보완하기 위하여 봉지 재배에서 응용된 바 있는데, 봉지 재배는 연잎효과를 나타내는 포도의 과분을 보호하여 무봉지 재배에서 포도 표면에 묻은 오염을 해결하는 것으로 알려져 있다(Personal com-

munication to Rural Development Administration, RDA). 아세톤처리 시 왁스결정체는 용해된 반면 기계 내 건조와 공기건조는 연잎 내부의 수분을 증발시킴으로써 왁스결정체를 유지할 수 있게 하였다. 그러나 기계 건조에서는 수분증발이 빠르게 진행되어 표피의 수축이 심하게 일어나며, 공기건조에 의한 수축은 적게 발생하나 고열과 압력에 취약한 왁스성분으로 인해 전자현미경 연구 시 결정체의 고배율 구조 촬영이 어렵다는 단점을 지닌다. 이에 본 연구에서는 연잎 표피구조에 대한 다각적 측면의 활용을 위해 이 세 가지 방법을 모두 사용하여 그 결과를 비교하였다.

생체시료를 위의 세 가지 방식으로 조사한 결과, 성숙한 잎 상피조직의 연잎효과 연구(Barthlott & Neinhuis, 1997)에서 알려진 돌기와 왁스결정체와 기공이 관찰되었다. 특히 돌기의 표면에는 900 nm 이하의 많은 왁스결정체가 밀생하였고, 상피의 엽신과 중앙 부위의 경계면에는 여러 층으로 형성되어 있다. 연잎 중앙은 엽신과 마찬가지로 미세돌기와 왁스결정체가 발달하여 고도의 초소수성 특징을 보이며, 기공은 엽신과 달리 열린 상태로 관찰되었다. 이와 대조적으로 하피조직의 경우, 왁스결정체는 발달하였으나 기공과 미세돌기는 형성되지 않았다. 잎 하피조직과 줄기에는 미세돌기가 없고 왁스결정체만이 형성되어 물방울이 스며들지는 않지만 초소수성도 나타나지 않았다. 이는 표피조직이 초소수성을 나타내기 위해서는 미세돌기와 왁스결정체의 상호작용이 필요하다는 것을 지지해주는 결과이다. 어린잎은 성숙한 잎에 비하여 엽신의 돌기 밀도가 매우 높고, 중앙 경계부의 돌기층 형성은 다소 적었으며, 어린 줄기에서는 왁스결정체가 더 발달하였다.

이와 같이 연잎의 모든 표피표면에서 왁스결정체가 분포하였으나 미세돌기는 엽신의 상피와 중앙 부위에만 발달하였다. 연잎효과를 나타내는 표피 위의 비교적 작은 크기의 돌기 즉, 미세돌기는 어린 단계에서부터 생장 중인 잎 표면에서 모두 형성되었고 그 밀도는 평균적으로 어린잎에서 높은 것으로 나타났다. 성숙 잎에서 미세돌기 밀도가 비교적 낮은 것은 어린잎에서 생성된 미세돌기가 생장함에 따라 상대적으로 그 수가 크게 증가하지 않기 때문으로 미세돌기의 형성은 미성숙 단계에서 활발하게 이루어지는 것으로 추정된다. 본 연구에서 얻은 이러한 결과는 이후 생체모방(Biomimetics) 응용에 있어서 연잎효과를 나타내는 표피조직의 단계별 활용에 관한 연구에 있어 유용한 기초자료가 될 것이다.

참 고 문 헌

Barthlott W, Neinhuis C: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202 : 1-8, 1997.

- Bhushan B: Bioinspired structured surfaces. *Langmuir* 28 : 1698-1714, 2012.
- Bhushan B, Her EK: Fabrication of superhydrophobic surfaces with high and low adhesion inspired from rose petal. *Langmuir* 26 : 8207-8217, 2010.
- Burton Z, Bhushan B: Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces. *Ultramicroscopy* 106 : 709-719, 2006.
- Cha T, Yi JW, Lee K, Moon M, Kim H: Super water repellent surface "strictly" mimicking the surface structure of lotus leaf. *Kor Soc Mech Engin Spring conference Proc. KSME 09MNO28* : 270-271, 2009.
- Cha T, Yi JW, Moon M, Lee KR, Kim H: Nanoscale patterning of microtextured surfaces to control superhydrophobic robustness. *Langmuir* 26 : 8319-8326, 2010.
- Dawood MK, Zheng H, Liew TH: Mimicking both petal and Lotus effects on a single silicon substrate by tuning their wettability of nanostructured surfaces. *Langmuir* 27 : 4126-4133, 2011.
- Ensikat HJ, Barthlott W: Liquid substitution: a versatile procedure for SEM specimen preparation of biological materials without drying or coating. *J Microsc* 172 : 195-203, 1993.
- Feng J, Wang F, Zhao Y: Electrowetting on a lotus leaf. *Biomicrofluidics* 3, 022406 : 1-10, 2009.
- Feng L, Zhang Y, Xi J, Zhu Y, Wang N, Xia F, Jiang L: Petal effect: a superhydrophobic state with high adhesive force. *Langmuir* 24 : 4114-4119, 2008.
- Feng L, Zhang Y, Li M, Zheng Y, Shen W, Jiang L: The structural color of red rose petals and their duplicates. *Langmuir* 26 : 14885-14888, 2010.
- Forbes P: Self cleaning materials: Lotus leaf-inspired nanotechnology. *Sci Amer Mag* 5 : 148-151, 2008.
- Fürstner R, Barthlott W, Neinhuis C, Wazel P: Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces. *Langmuir* 21 : 956-961, 2005.
- Gao L, McCarthy TJ: Teflon is hydrophilic. Comments on definitions of hydrophobic, shear versus tensile hydrophobicity, and wettability characterization. *Langmuir* 24 : 9183-9188, 2008.
- Guo Z, Liu W: Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure. *Pl Sci* 172 : 1103-1112, 2007.
- Gould P: Smart, clean surfaces. *Materialstoday* November : 44-48, 2003.
- Graham LE, Graham JM, Wilcox LW: *Plant Biology*. 2nd ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River. pp. 190-206, 2006.
- Kang C, Keum D, Kim G, Seo S: An Interesting Journey to the Nano Science and Technology. Yangmoon, Seoul, pp. 57-64, 2006.
- Karthick B, Maheshwari R: Lotus-inspired nanotechnology applications. *Resonance* 13 : 1141-1145, 2008.
- Koch K, Barthlott W: Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials. *Phil Trans R Soc A* 367 : 1487-1509, 2009.

- Koch K, Bohn HF, Barthlott W: Hierarchically sculptured plant surfaces and superhydrophobicity. *Langmuir* 25 : 14116-14120, 2009.
- Lee KB: Plant Anatomy. Life Science Co. pp. 77-86, 2004.
- Marmur A: The lotus effect: superhydrophobicity and metastability. *Langmuir* 20 : 3517-3519, 2004.
- Muller F, Michel W, Schlicht V, Tietze A, Winter P: Self cleaning surfaces using the Lotus effect. Elsevier. pp. 791-811, 2007.
- Neinhuis C, Barthlott W: Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Ann Bot* 79 : 667-677, 1997.
- Nun E, Oles M, Schleich B: Lotus effect surfaces. *Macromol Symp* 187 : 677-682, 2002.
- Otten A, Herminghaus S: How plants keep dry: a physicist's point of view. *Langmuir* 20 : 2405-2408, 2004.
- Peacock J, Rensburg L, Kruger H, Merwe CF: Liquid substitution: an alternative procedure for leaf surface studies with scanning electron microscopy. *Scan Microsc* 12 : 401-412, 1998.
- Shafiei M, Alpas AT: Nanocrystalline nickel films with lotus leaf texture for superhydrophobic and low friction surfaces. *Appl Surf Sci* 256 : 710-719, 2009.
- Shen P, Uesawa N, Inasawa S, Yamaguchi Y: Characterization of flowerlike particles obtained from chemical etching: visible fluorescence and superhydrophobicity. *Langmuir* 26 : 13522-13527, 2010.
- Spori DM, Drobek T, Zürcher S, Ochsner M, Sprecher C, Mühlbach A, Spencer ND: Beyond the lotus effect: roughness influences on wetting over a wide surface-energy range. *Langmuir* 24 : 5411-5417, 2008.
- Wagner P, Furstner R, Barthlott W, Neinhuis C: Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces. *J Expt Bot* 54 : 1295-1303, 2003.
- Xia F, Jiang L: Bio-inspired, smart, multiscale interfacial materials. *Adv Mater* 20 : 2842-2858, 2008.

< 국문초록 >

연잎효과는 연꽃의 잎에서 규명된 현상으로 표피세포에서 기원하는 미세구조에 의해 물방울이 잎 표면이나 내부조직에 침투하지 않고 경사면으로 흘러내리며 표면 위 먼지나 이물질을 함께 떨어지게 한다. 잎 표면을 항상 깨끗한 상태로 유지하는 자기정화 능력인 연잎효과에 대해서는 여러 영역에서 연구되고 다방면으로 응용되고 있으나 구조적인 측면에서 연잎을 생장단계별 또는 표피조직 부위별로 비교 조사한 연구는 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 연잎과 줄기를 대상으로 생장단계별, 부위별 표피조직의 미세 표면구조를 연구하여 연잎효과 표면 특성을 조사하였다. 본 연구에서 조사된 연잎효과는 미세돌기와 왁스결정체가 발달한 잎의 상피조직에서만 나타나고, 왁스결정체만 발달한 하피 및 줄기의 표피조직에서는 확인되지 않았다. 이는 미세돌기의 발달이 연잎효과를 나타내는데 가장 중요한 요인이고, 왁스결정체가 돌기표면 위에 축적되면 연잎효과는 더 증가하는 것으로 밝혀졌다.

FIGURE LEGENDS

- Fig. 1.** Upper epidermis of a mature leaf exhibiting the Lotus effect. Arrow indicates a water drop near the center of the leaf.
- Fig. 2.** A water drop (arrow) on the surface of a young stem.
- Fig. 3.** Upper epidermis (U) of a mature leaf densely covered by small papillae.
- Fig. 4.** Close-up of Fig. 3 exhibiting numerous papillae (P).
- Fig. 5.** Lower epidermis (L) of a mature leaf with densely covered wax crystalloids. Inset, same as Fig. 5, but processed by graded acetone dehydration. Bar=25.0 μ m.
- Fig. 6.** Shrunken papillae (P) of the upper epidermis in a mature leaf after acetone dehydration. St, stoma.
- Fig. 7.** Thickened central area (C) of the mature leaf upper epidermis.
- Fig. 8.** Higher magnification of Fig. 7 demonstrating numerous papillae and stomata (St) with wax crystalloids in the mature leaf.
- Fig. 9.** Irregular boundary layers between leaf center (C) and blade (right) in a mature leaf. Note difference in thickness of the central area compared to the leaf blade.
- Fig. 10.** Epidermis with stomata (St) without wax crystalloids processed by acetone.
- Fig. 11.** Epidermal surface of a mature stem (ST).
- Fig. 12.** Close-up of Fig. 11 showing rows of loosely arranged and less frequent wax crystalloids (arrows).
- Fig. 13.** Epidermal surface of a young stem (ST) densely covered with wax crystalloids. Compare to Fig. 11.
- Fig. 14.** Close-up of Fig. 13 with thickly arranged wax crystalloids (WC).



